Vertikale Bewegungen des Bodenwassers mit besonderer Berücksichtigung der Rekondensation

Hans-Gerhard Isert

VERTIKALE BEWEGUNGEN DES BODENWASSERS MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER REKONDENSATION

VERTIKALE BEWEGUNGEN DES BODENWASSERS MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER REKONDENSATION

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548123_0066

Vertikale Bewegungen des Bodenwassers mit besonderer Berücksichtigung der Rekondensation

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
einer Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Martin Luther-Universität
Halle-Wittenberg

Vorgelegt von
Hans-Gerhard Isert
aus Berlin

Halle a. d. Saale, 1937

Meinem sehr verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. H. Scupin

(† am 22. Nov. 1937) in Dankbarkeit

1. Berichterstatter: Prof. Dr. H. Scupin †

2. Berichterstatter: Prof. Dr. L. Meyer

3. Berichterstatter: Prof. Dr. J. Weigelt

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 1937

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Druck: Graphische Kunstanstalt W. Schütz, München 22, Herrnstraße 10

Zu dieser Arbeit wurde ich angeregt durch meinen sehr verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. H. Scupin, Halle (Saale). Unstimmigkeiten über die Beurteilung des Wasseraufstiegs über dem obersten Grundwasserstock, die in Prozessen und Gutachten immer wieder zu falschen Vorstellungen und Schlüssen führten, gaben den Anlaß, die Aufstiegsmöglichkeiten des Wassers endlich einmal unter Bedingungen zu untersuchen, die den natürlichen Verhältnissen angepaßt sind.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. H. Scupin meinen besonderen Dank aussprechen für Förderung und Ratschläge, die er mir jederzeit für meine Arbeit zuteil werden ließ. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Meyer vom Institut für Pflanzenernährung und Bodenbiologie der Universität Halle danken für seine Anregungen und in mündlicher Aussprache gebotenen Stützpunkte aus seinem an Erfahrungen reichen Arbeitsgebiet.

Gerhard Isert.

Inhalt

	Seite
Stand der Frage	7
Bisher durchgeführte Versuche	20
Chemische Untersuchungsmethoden	29
Hydrologische Untersuchungsmethoden	32
Die Versuchseinrichtung zur Beobachtung der Bodenwasser-Bewegungen	36
Beobachtungen über die Feuchtigkeitsstruktur bei Sandfüllung	43
Feuchtigkeitsuntersuchungen mit Löß	56
Über Einwanderung von Wasserdampf der Luft	59
Beobachtungen über Tagesschwankungen	61
Beobachtungen über plötzliche Temperatur-schwankungen	63
Schlußbetrachtung und Ergebnis	66
Literatur	69

Stand der Frage

Über den Feuchtigkeitsbefund innerhalb des Erdbodens zwischen Atmosphäre und oberstem Grundwasserstock liegen gewisse Anschauungen vor, die zwar schon Erörterungen theoretischer und praktischer Art brachten, denen aber eine exakte experimentelle Beweisführung fehlt.

Es ist bekannt, daß wir über dem Grundwasser eine Zone kapillaren Anstiegs haben, die bisher im Schulbeispiel als Laboratoriumsversuch unter Einfüllung des Gesteins in Röhren untersucht wurde (KOEHNE 1928, KEILHACK 1935). Insbesondere interessiert hier die kapillare Steighöhe.

Ein Vergleich des kapillaren Anstiegs mit dem in feinen Glasröhren ist nicht durchführbar. Unser Erdboden gibt eine ganz andere Struktur, die nicht mit einer durchgehenden und gleichförmigen Röhre verglichen werden darf. Wir treffen ein weit verzweigtes System kapillarer Rohre von feinstem, aber auch nicht konstantem Durchmesser an, die regellos nach jeder Richtung verlaufen.

Diese besondere Struktur gibt uns eine Erklärung, weshalb der kapillare Anstieg im Erdboden als besonders groß angesehen werden darf, indem begünstigende Bedingungen vorliegen. Durch die Kornstruktur des Erdbodens haben wir in gewisser Weise „Treppen", auf denen das emporgestiegene Wasser ruht und von denen aus ein erneuter Anstieg bis zur nächsten Stufe erfolgen kann[1]).

Falsch ist aber auch die Meinung, daß der kapillare Anstieg auf diese Weise unendlich weit reichen könne, wenn nicht durch irgendwelche Einflüsse (Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln, Verdunstung, Änderung der Bodenverhältnisse) eine gewisse Grenze gesetzt wäre. Der kapillare Anstieg hat seine Grenze, die schon durch die Definition des Kapillarsaumes gegeben wird:

Der Kapillarsaum reicht n i c h t vom Grundwasserspiegel bis zum Ende eines nachweisbaren Feuchtigkeitsgehaltes im Boden bzw. bis zu einem Feuchtigkeitsminimum; es darf nur so weit mit einem Kapillarsaum gerechnet werden, wie die Poren des Erdbodens zu 100% mit Wasser gefüllt sind.

Über dem Kapillarsaum treffen wir eine mehr oder weniger große Bodenfeuchtigkeit an, die dem sogenannten „Zwischenstreifen" zugeordnet wird, der eine mittlere Zone zwischen Kapillarsaum und einer oberen Bodenzone, die unmittelbar an die Atmosphäre grenzt, bildet (KOEHNE, Stuttgart 1928). Diesem Begriff des Zwischenstreifens haftet in seiner Bezeichnung etwas Labiles an, das eine Verbindung mit hydrologischen Erscheinungen nicht gestattet.

Eine bessere Trennung der Gegebenheiten schaffen die von F. ZUNKER (Breslau 1926) aufgestellten Begriffe, die eine Gliederung in Grundwasser, Kapillarwasser, Haftwasser, hygroskopisches Wasser und

---

[1]) Auf das Vorhandensein und die Bedeutung eines weit verzweigten Netzes von Kapillaren wies bereits O. LUEGER (Stuttgart 1914—16, Seite 22) hin, ohne allerdings den Begriff der „Treppe" zu verwenden, der wohl am besten die Art des kapillaren Aufstiegs kennzeichnet.

Senkwasser geben. Den Begriffen „Haftwasser" und „hygroskopisches Wasser" kommt noch nicht unmittelbar eine genetische Klärung zu.

Die amerikanischen Vorstellungen über den Feuchtigkeitsaufbau im Erdboden sind mit den deutschen Anschauungen gut in Einklang zu bringen. MEINZER (Washington 1923) gliedert die Feuchtigkeitsbereiche in das Spiegelwasser, den sich darüber erstreckenden Kapillarsaum und faßt diese beiden Zonen begrifflich als Grundwasser zusammen. Die darüber befindliche Zone, in der neben Wasser auch Luft angetroffen wird, enthält Haft- und Sickerwasser.

Eine sekundäre Gliederung gibt MEINZER in Bodenwasserzone Zwischenwasserzone und Kapillarsaum. Er rechnet die Bodenwasserzone so weit, wie das Wasser von den Pflanzenwurzeln erfaßt wird. Die zwischen Kapillar- und Bodenwasserzone liegende sogenannte Zwischenzone ist für den Pflanzenbau nicht nutzbar. Bei hohem Wasserstand kann die Zwischenzone fehlen. Die Vegetation entnimmt dann ihr Wasser direkt aus dem Kapillarbereich und damit Spiegelwasser. Solche Pflanzen werden als „Phreatophyten" bezeichnet. Sie bewirken ein stetiges Nachsteigen des Wassers aus der Spiegelzone.

Eine genauere Diskussion der Zwischenzone findet nicht statt. Sie wird als Sickerwasserzone gekennzeichnet, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß beim Vorgang der Wasserversickerung die Korngröße des Materials und die Feuchtigkeitsbeschaffenheit eine wichtige Rolle spielen, wie das E. KRÜGER (Breslau 1925) zum Ausdruck bringt. Seine Untersuchungen zeigen für den Wasserabstieg durch Versickerung das Ergebnis, daß die Zunahme des Wassergehaltes um so größer ist, „je grobkörniger der Boden und je höher über dem Grundwasser die Schicht ist".

Zu einer sinngemäßen Namensgebung der verschiedenen Zonen über dem Spiegelwasser werden erst bestimmte Untersuchungen berechtigen, deren Einleitung wir in den begrifflichen Erörterungen von H. SCUPIN (Halle 1935 a) angeregt und in einer späteren Arbeit (1935 b) vorgeschlagen sehen dürfen.

Bei einer Darlegung über die hydrologische Bedeutung der oberen, als Kappe auf dem Zwischenstreifen sitzenden Bodenzone sind nicht allein die Sickerwässer zu berücksichtigen, sondern ist außerdem mit einem Einfluß der Kapillarität und Hygroskopizität zu rechnen.

Im Bereich des bisher als Zwischenstreifen bezeichneten Bezirkes treffen wir eine mehr oder weniger große Feuchtigkeitsmenge an, die die Poren nur teilweise füllt. Für diese Zone finden wir Begriffe wie „Porenwasser", „Porenwinkelwasser", „Filmwasser", „Häutchenwasser" usw., die in ihrer Mannigfaltigkeit gerade wegen einer an sich zweifellos identischen Bedeutung verwirren können. Um den Zwischenstreifen begrifflich zu fixieren, wollen wir die Ursache der Entstehung dieser Feuchtigkeitszone zur Grundlage nehmen.

Es werden zwei Möglichkeiten mitsprechen. Die Molekularkräfte bewirken eine Wasserfesthaltung im gesamten Zwischenstreifen, der insbesondere über dem Kapillarsaum als ein partieller Aufstieg in den Porenwinkeln zu verstehen ist, wobei die „Treppenwirkung" wesentlichen Einfluß haben mag. Einen weiteren Anteil finden wir in Kondensationserscheinungen, die sich über dem Kapillarsaum abspielen und

zur Schaffung einer allerdings überspitzten Kondensationstheorie geführt haben.

Für die erste Möglichkeit, d. h. für die Zone des Porenwinkelwassers prägte P. VAGELER (Berlin 1932) den Begriff des offenen Kapillarwassers. In diesem Stadium ist eine rein kapillare Wasserbewegung unmöglich. Es müßte deshalb die Vegetation unterbrochen sein, wenn nicht auf anderem Wege ein Wasserzustrom erfolgen würde, der zu den Pflanzenwurzeln gerichtet ist, die längst nicht immer bis in den Kapillarsaum reichen. Dieser Feuchtigkeitszustrom wird von VAGELER durch die Kinetik des Wassers vom Standpunkt der elektrischen Theorie der Materie geklärt.

Voraussetzung für Kapillarität ist Benetzbarkeit der die Kapillaren bildenden Substanz. „Kapillarer Hub erfolgt dann, wenn die Moleküle der Flüssigkeit von den Phasengrenzflächen sorbiert werden ..., also wenn entgegengesetzte elektrische Kraftfelder zwischen fester Substanz und Flüssigkeit sich ausgleichen ... Die Hebung erfolgt durch die Hydratationsenergie der Ionen und Moleküle der Grenzflächen, und nur wenn zwei ‚gehobene' Wasserfilme bei engem Abstande der Phasengrenzflächen ineinanderlaufen, entsteht ein Meniskus."

Spuren von Verunreinigungen sind für die Wirkung kapillarer Kräfte schädlich, da die elektrischen Kräfte der Oberfläche bereits durch eine andere Substanz kompensiert sind.

Die Bewegung des Wassers im Boden, einem nach VAGELER als „polydispers polar" bezeichnetem System, wird durch das Hydratationsbestreben der festen Substanz geklärt. Zieht man von diesen Ausführungen VAGELER's Brücken zu den praktischen Untersuchungen, so fällt deren Klärung wesentlich leichter. „Die Molekularkraft der Wasserhülle der Bodenteilchen ist der Grund der Wasserhebung durch den Boden". Ergänzend wird nach W. WEISE[2]) u. a. hinzuzufügen sein, daß der Motor dieser Hebung die Temperaturschwankungen sind, die eine Luftbewegung nach sich ziehen und so das Hydratationsbestreben befriedigen. VAGELER schafft hier den Begriff der Kapillarkondensation.

Für die Kondensationserscheinungen sind Beschaffenheit der Bodenluft im Hinblick auf Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur maßgebend. Die Bodenluft führt ständig eine mehr oder weniger große Menge Wasserdampf mit sich. Im Laufe eines Tages treten Temperaturschwankungen ein, die größer oder kleiner sind; besonders bedeutend sind sie an der Bodenoberfläche und in den obersten Bodenschichten. Da nun die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasser mit sinkender Temperatur immer geringer wird und sich das über die somit gegebenen Grenzen vorhandene Wasser ausscheidet oder kondensiert, ist bei Temperaturwechsel Wasserkondensation oder Wasserdampfbildung anzunehmen; dieses tritt bei Erwärmung, jenes bei Abkühlung ein.

Um die Zusammenhänge zu veranschaulichen, seien die größtmöglichen Wassermengen angegeben, welche die Luft bei verschiedenen Temperaturen maximal zu lösen vermag:

---

[2]) Vgl. Seite 13 ff.

In 1 m³ Luft sind bei	— 10° C	2,3 H_2O enthalten,
	— 5	3,4
	— 0	4,9
	+ 5	6,8
	+ 10	9,4
	+ 15	12,7
	+ 20	17,1
	+ 25	22,8

Kondensationserscheinungen treten trotz Abkühlung nicht auf, wenn der Wassergehalt der Luft weniger als 100% der Sättigungsmenge beträgt. Wir haben damit auch nicht im Erdboden wegen einer oft angenommenen hier fördernden Einwirkung der Bodenteilchen zu rechnen, sofern keine Sättigung erreicht ist.

E. HEIDEN (Berlin 1881) hat bereits auf Grund einfacher Versuche gezeigt, daß von einem Kondensationsvermögen der Böden für Wassergas nicht gesprochen werden darf, sondern für Kondensationsvorgänge im Erdboden eine Überschreitung der Sättigungsmenge verantwortlich zu machen ist, die durch Temperaturerniedrigung erfolgt.

Wie A. F. LEBEDEFF (Berlin 1927—28) feststellte, ist die relative Feuchtigkeit der Bodenluft stets gleich 100%, wenn die Hygroskopizität des Bodens befriedigt ist. Unter natürlichen Bedingungen ist die Bodenluft bei einer Tiefe von 5—10 cm ab immer mit Wasserdampf gesättigt. Während der Nacht wird die absolute Feuchtigkeit der Atmosphäre größer als die Wasserdampfspannung in der obersten Bodenschicht. „Unter diesen Umständen muß der atmosphärische Wasserdampf in den Boden eindringen und sich dort kondensieren". Wie weit gleichzeitig ein Wasseraufstieg bis zu der genannten obersten Bodenschicht verbunden ist, wird nicht ausgeführt.

Die Kondensationserscheinungen haben zu einer regelrechten Kondensationstheorie geführt. Wie W. KOEHNE (Stuttgart 1928, Seite 75) angibt, brachte O. VOLGER 1877 in der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Ingenieure zum Ausdruck, „kein Wasser des Erdbodens rühre vom Regenwasser her." VOLGER leitet diese Anschauung von einer Beobachtung ab, indem ein starker Sommerregen nur die obersten Bodenschichten durchfeuchtet und diese hier spezielle Erscheinung, die an eine die Schwerkraft überwiegende Kapillarität gebunden ist, fälschlich verallgemeinert wird. Weiter bringt VOLGER zum Ausdruck, daß eine fehlende Versickerung der Flüsse als ein Beleg für die Unmöglichkeit einer allgemeinen Feuchtigkeitsversickerung zu betrachten sei. In Wirklichkeit liegt diese Erscheinung auf ganz anderem Gebiet, indem die Flußverschlammung einzubeziehen ist[3]).

Ein weiterer Verfechter dieser Theorie, die Kondensation als wesentlichen Grundwasserbildner anspricht, ist HALBFASS, der in den „Naturwissenschaften" vom April 1927 anführt, daß ein See bei Quickborn (südl. Holstein) in längeren Trockenperioden stieg, jedoch nach Niederschlägen fiel. HALBFASS ist der Meinung, daß im kiesigen

[3]) Eine Zusammenstellung der für die Flußverschlammung in Betracht zu ziehende Literatur gibt E. HIRT, Halle 1937.

Untergrund des Sees Wasserdampf kondensiert wird, der zur Erhöhung des Wasserspiegels dieses Sees beitragen soll. Er hat aber ganz übersehen, daß das den Wasserstand bedingende Grundwasser eine bestimmte Fließzeit verlangt, die sich vom Einströmungsgebiet her über Tage erstreckt, eine Kondensation am Grunde des Sees aber überhaupt nicht stattfinden kann, weil hier eine Anfüllung mit Grundwasser vorliegt.

Wir werden mit MEZGER (1927, Seite 501—514) festhalten müssen, daß die durch die Kondensation erreichten Beträge bei täglicher Betrachtung innerhalb enger Grenzen anzusehen sind und die Verdunstung des kondensierten Wassers wieder eine gewisse Verminderung mit sich bringt.

Zu einer Ablehnung der Kondensationstheorie darf man allerdings nicht kommen, wenn zwar auch für den Einzelfall die jeweiligen Bodenverhältnisse ausschlaggebend sind, wie das E. HESSELINK und J. HUDIG (Braunschweig 1923) zeigten. Es wurden Untersuchungen durchgeführt, die Ergebnisse über die Möglichkeit einer Aufforstung von Inlanddünen in Holland bringen sollten. Es handelte sich dabei um das Studium des Flugsandbodens, „der eine sehr geringe wasserhaltende Kraft zeigt".

Die Untersuchungen wurden vorgenommen in abgeschlossenen Kästen von 150×150 cm Oberfläche und 100 cm Tiefe, die mit dem betreffenden Sand gefüllt und z. T. mit zweijährigen Kiefern bepflanzt wurden. Von allen Seiten wurden die Kästen so in den natürlichen Erdboden eingebaut, daß sie die Temperatur ihrer Umgebung annehmen konnten.

Die Kästen wurden am 8. und 11. Mai 1922 gewogen, nachdem in dieser Zeit keine Niederschläge fielen. Es ergab sich eine Gewichtszunahme überall dort, wo die Pflanzenbedeckung fehlte und wo eine Kies- oder Lupinenstrohbedeckung vorlag. Umrechnungen lieferten eine Feuchtigkeitszunahme, die bis zu 3,1 mm Niederschlag entsprach.

Nicht die wasserhaltende Kraft des Bodens ist für die kondensierten Mengen maßgebend. Bei einer Kiesbedeckung des Untersuchungsbodens wird größte Feuchtigkeitszunahme angetroffen, obwohl infolge großer Lufträume gute Zirkulation gegeben ist. Temperaturmessungen zeigen aber, daß gerade bei Kiesbedeckung in 20 cm Tiefe besonders auffallende Temperaturschwankungen im Laufe eines Tages vorliegen, durch die eine bedeutendere Feuchtigkeitszunahme gleichzeitig gerechtfertigt wird[4]).

Über die Kondensationsvorgänge äußert sich auch DAMMANN (Berlin 1905). DAMMANN bringt zum Ausdruck, daß die Feuchtigkeitszuführung in den Erdboden nicht allein durch Niederschläge und Grundwasser erfolgt, sondern darüber hinaus auch Taubildung und Hygroskopizität[5]) eine Rolle spielen. Das geschieht in gasförmige Wasser der Atmosphäre zu kondensieren.
folgender Weise:

[4]) Die betreffenden Werte können der „Meteorol. Ztschr." 1923, Seite 183, entnommen werden.

[5]) Unter Hygroskopizität ist die Fähigkeit des Bodens zu verstehen, das gasförmige Wasser der Atmosphäre zu kondensieren.

„Die während des Tages erwärmte obere Schicht des Bodens kühlt sich während der Nacht infolge der Wärmeausstrahlung bedeutend ab. Die unteren Luftschichten haben sich am Tage mit Wasser gesättigt und verlieren dasselbe nun, wenn sie mit dem abgekühlten Boden in Berührung kommen. Das in ihnen enthaltene Wasser setzt sich in tropfbar flüssiger Form an der Oberfläche des Bodens und den darauf stehenden Pflanzen ab."

Über die Kondensationsvorgänge im Bereich der im Boden befindlichen Luft finden wir bei DAMMANN die Ausführungen:

„In derselben Weise wird das durch die Erwärmung der tieferen Schichten des Bodens in Gasform übergeführte und in die Oberflächenschicht emporgestiegene Wasser durch die Abkühlung der letzteren während der Nacht wieder in tropfbar flüssige Form verwandelt und gibt so zur Wasseranreicherung dieser Oberflächenschicht Veranlassung."

Der Kondensation von Wasser im Boden steht auch BRUINSMA (1935) zustimmend gegenüber. Er bringt zum Ausdruck, daß die Bodenkapillaren einen besonders hohen Einfluß auf den Wassergehalt der Luft haben. Die Taubildung an der Bodenoberfläche und im Boden ist nach seiner Ansicht nicht so klein, daß sie für einen Einfluß auf das Grundwasser vernachlässigt werden dürfte.

Fassen wir den Begriff des Grundwassers allgemein, verstehen wir also nach H. SCUPIN darunter das gesamte im Boden befindliche Wasser, so weit es aus der Spiegelzone aufgestiegen ist (Halle 1935 a), so wären die Ansichten von BRUINSMA von besonderem Wert. Wie weit diese begriffliche Festlegung hier zutrifft, ist allerdings nicht zu sagen.

Auf Grund der sich regelmäßig wiederholenden Temperaturschwankungen wird ein beträchtlicher Teil der im Zwischenstreifen, d. h. über der Kapillarzone befindlichen Feuchtigkeit wiederholt kondensiert. Anderseits dient als Vorrat für diese Feuchtigkeit das primär durch überirdische Kondensation entstandene Kapillarwasser. Diese Tatsachen veranlaßten H. SCUPIN, die gesamten die Feuchtigkeit bildenden Erscheinungen im Zwischenstreifen als Rekondensation zu benennen, womit dem Zwischenstreifen zugleich eine klärende Bezeichnung als Rekondensationszone zukommt (H. SCUPIN, Halle 1935 b).

In diesem Zusammenhange erscheint die von F. SEKERA (Berlin 1931) ausgesprochene Annahme eines Wassernachstromes zu den Pflanzenwurzeln von Interesse, der während der Nacht erfolgen soll. Dies fällt zeitlich mit den möglichen Kondensationserscheinungen zusammen, ohne daß SEKERA allerdings den Begriff der Kondensation anführt. Vielmehr spielt bei ihm die „Saugkraft des Bodens" eine Rolle, worunter der Wasserübertritt vom Feuchten zum Trockenen zu verstehen ist[6]).

Auch F. H. KING (Wisconsin 1890) hat schon zum Ausdruck gebracht, daß eine Bewegung des Wassers von an Feuchtigkeit reicheren zu ärmeren Teilen im Boden erfolgt, die an keine Richtung gebunden ist.

Eine wichtige Betrachtung führt bereits theoretisch W. WEISE (Berlin 1894) durch. Bei ihm gewinnt gleichzeitig das Problem der

[6]) Vgl. LEBEDEFF, Berlin 1927/28.

Dürre für die landwirtschaftlichen Bereiche Deutschlands, insbesondere für die Gegend von Münden weitestgehende Berücksichtigung. Der Vorsommer 1893 war eine außerordentlich trockene Periode, an die sich seine Betrachtungen anschließen: „Von den im Felde und im Garten ausgesäten Sämereien ging nur ein kleiner Teil auf, vermutlich der, welcher zufällig von den wenigen Sprühregen rechtzeitig etwas erhielt oder in besonders günstiger Lage viel vom Tau empfing. Monatelang blieben die Felder mit Sommerung dünn bestellt, und in den Gärten deckte nicht einmal Unkraut den Boden. Die Wiesen ergrünten nicht, sondern wurden, je länger der leuchtende Himmel blieb, immer brauner; vielfach verbrannte die Grasnarbe, und nur Minderwertiges hielt sich..."

„Bei allem Unglück und allen schlimmen Aussichten blieb für die Umgebung Mündens von April bis zur Ernte eins merkwürdig und rätselhaft, nämlich die Entwicklung der Wintersaaten, namentlich des Roggens. Er stand zwar nicht sehr dicht, aber die Halme dehnten und reckten sich wie nur je in guten Jahren; lange Ähren, guten Ansatz, gute Frucht zeitigte er, so daß in dieser Beziehung die Ernte eine wirklich gute wurde. Jedermann weiß, daß in dürren Vorsommern in der Regel das Stroh nur ganz kurz wird, und daß wir hier vor merkwürdigen Ausnahmeverhältnissen standen."

Die geschilderte Erscheinung wird von W. WEISE ganz zutreffend damit geklärt, daß zwar die Oberfläche des Bodens trocken war, aber in Tiefen ab 5 cm eine gewisse Durchfeuchtung vorlag. Damit war ein Keimen nicht möglich, wohl aber fanden die Pflanzen mit entwickelten Wurzeln hinreichend Wasser. Es liegt an sich der Gedanke einer kapillaren Grundwasserhebung außerordentlich nahe, die allerdings einen hohen Grundwasserstand voraussetzen würde (vgl. S. 22 ff). Es war jedoch das Gegenteil der Fall. W. WEISE führt aus: „... und es wird das bewiesen durch das Versiegen fast aller Quellen, durch das Austrocknen der Brunnen, durch die außerordentlich niedrigen Wasserstände der Stromläufe[7]). Nein, der Grundwasserspiegel hat sich gesenkt, so daß die kapillare Hebung bis zu solchen Höhen nicht angenommen werden kann und nach anderen Gründen gesucht werden muß."

Als einen hierzu grundlegenden Faktor sieht W. WEISE die Bodentemperatur an. Von hier gelangt er zu der wichtigen Feststellung, daß die Bodentemperatur der „Motor" ist, der Kondensationserscheinungen im Boden bewirkt und eine Hebung des Wassers bedingt. Seine Feststellungen sind so wichtig, daß hierauf näher eingegangen werden muß.

Für die Monate April, Mai und Juni 1893 werden Durchschnittstemperaturen für verschiedene Bodentiefen für die Zeit von 8 Uhr morgens und für mittags angegeben. Aus diesen Daten ist gleichzeitig zu entnehmen, daß tägliche Temperaturschwankungen bis zu einer Bodentiefe von 1 m und mehr vorkommen. Weiter ist hervorzuheben, daß das Temperaturmaximum am Tage an der Oberfläche liegt und

[7]) Die Ansicht von W. WEISE deckt sich hier mit Feststellungen von E. HIRT (Halle 1937), der einen Zustrom von Grundwasser in das Flußwasser festgestellt hatte, diese Zusammenhänge allerdings von örtlichen Gegebenheiten abhängig macht.

während der Nacht in die Erde bis zu einer Tiefe von etwa 30 cm wandert.

Mit diesen Temperaturbedingungen ist eine Bewegung der Bodenluft verbunden. „Wenn die Oberfläche das Maximum verliert, muß die Luft aus der unteren wärmeren Schicht nach oben steigen. Die Tiefe dieser Bewegung geht zunächst entsprechend der Wanderung des Maximums bis 0,3 m."

Durch den Luftaustritt in die Atmosphäre muß ein Ersatzstrom von der Atmosphäre in den Boden dringen. Gerade bei Trockenheit wird die Bewegung besonders leicht möglich sein, weil die Kapillaren dann stärker mit Luft gefüllt sind.

Sinkt die äußere Temperatur, so wird ein Luftstrom in die Erde eintreten, die Bodenwärme zunächst der oberen Schicht herabsetzen, schließlich aber auch tiefer als 30 cm vordringen. Das zieht notwendig ein Aufsteigen der darunter befindlichen wärmeren Luft nach sich. Bei geeigneten Temperaturunterschieden wird die Tiefe von 1 m nicht nur erreicht, sondern auch überschritten, wie WEISE zeigt. Für die Temperatur der Außenluft wird als durchschnittliches Minimum angegeben für April 0,2, für Mai 6,7 und für Juni 9,2°. Bringt man diese Werte in Zusammenhang mit den Angaben für die Bodentemperatur morgens, so zeigte sich, daß eine bedeutende Tiefenwirkung möglich sein kann.

Da sich nun die aufsteigende Luft allmählich abkühlt, wird eine Kondensation des in ihr enthaltenen Wasserdampfes erfolgen. Die Aufnahme dieser Feuchtigkeit erfolgt tagsüber in der Tiefe des Bodens, im Bereich des Porenwinkelwassers, das seinerseits wieder vom Kapillarwasser her ergänzt wird, d. h. also vom Grundwasser aus.

Das Ergebnis der Überlegungen und Untersuchungen von WEISE sei hier zitiert: „Ist die (Temperatur-)Differenz zwischen Boden- und Außenluft sehr groß, so dringt diese bis zu Tiefen ein, die noch jenseits der Schicht mit Maximaltemperatur (30 cm) liegt, bewirkt demnach ein Aufsteigen der Bodenluft aus diesen tieferen Schichten.

Die Bewegung der Luft zieht eine Hebung der Feuchtigkeit aus den tieferen Schichten nach der Oberfläche nach sich und je nach den Temperaturverhältnissen der Außenluft mehr oder minder starken Tauniederschlag in den oberen Bodenschichten und auf der Bodenoberfläche."

Durch einen anschaulichen Versuch konnte WEISE die Feuchtigkeitsanreicherung im Erdboden belegen. Er berichtet: „Nachdem bis zum 12. Februar 1894 durch auffallend hohe Temperaturen der Boden erwärmt war, lagen die Verhältnisse so, daß ein Wetterumschlag wahrscheinlich war. Es wurden nun Glasröhren in den Boden eingelegt, in welche die Luft nur aus bestimmten Tiefen eintreten konnte. Die Röhren wurden so gebogen, daß an den Wandungen niedergeschlagene Feuchtigkeit sich in den Biegungen sammeln mußte. In den darauf folgenden Tagen zeigte bald die eine, bald die andere Röhre in dem Knie so viel Wasser, daß es bei Veränderungen in der Lage der Röhre hin- und herlief."

Die Bildung des unterirdischen Taues kann durch verschiedene Faktoren gefördert werden, wie A. W. SPERANSKIJ und TH. KRASCHENINNIKOW (1907) ausführen. Hohe absolute Luftfeuchtigkeit, große Hygroskopizität des Bodens, starker Temperaturunterschied zwischen

unteren und oberen Bodenschichten, großer Umfang der Temperaturschwankungen der oberen Schicht und Luftdurchlässigkeit des Bodens sind maßgebend. Luftdurchlässigkeit und starke Temperaturunterschiede zwischen oberen und unteren Bodenschichten werden durch Lockerung der Bodenoberfläche erreicht.

Zwischen Bodenluft und atmosphärischer Luft besteht direkte Verbindung. Aus diesem Grunde wird man auch von einem Zusammenhang im Hinblick auf die Taubildung sprechen dürfen.

Die Taubildung ist als Produkt der Kondensation der in der Atmosphäre und im Boden befindlichen Feuchtigkeit anzusehen, wie es WOLLNY (Leipzig 1893) zeigt. Der Boden ist insofern beteiligt, als sich das Temperaturminimum über dem Boden befindet und die durch Wärmestrahlung und Transpiration der Vegetation austretende Feuchtigkeit hier kondensiert wird.

Bei der Taubildung „nimmt der Boden im lufttrockenen Zustande während der Nacht Feuchtigkeit auf, die sich entweder in tropfbar flüssiger Form an der Oberfläche bemerkbar macht oder unsichtbar bleibt. Ferner sind die betreffenden Wassermengen geringer, wenn das Erdreich bereits mit größeren Mengen hygroskopischen Wassers aus dem feuchten Untergrund versehen war".

Russische Ansichten stehen gegen die insbesondere von W. WEISE vertretenen Anschauungen. Es mag hier der tiefe Grundwasserstand mitsprechen, der die russischen Verhältnisse anders erscheinen läßt, wenngleich auch die Versuche von HESSELINK und HUDIG (vgl. Seite 11) eine Feuchtigkeitseinwanderung aus der Atmosphäre ergaben, für die anderseits die Bodenart und Bodenbeschaffenheit maßgebend sein mögen.

Die russischen Untersuchungen knüpfen an Methoden zur Bekämpfung der Dürre an, die eine breite Untersuchung vom landwirtschaftlichen Standpunkt durch W. G. ROTMISTROFF (Dresden und Leipzig 1926) findet. Seine Arbeit bezieht sich allerdings auf Grundwassertiefen bis zu 40 m.

Bekämpfungsmaßnahmen der Dürre mit mehr geologischem Charakter sind z. T. bereits von A. SCHISCHKIN vor 60 Jahren vorgeschlagen, die durch ROTMISTROFF zu einer kritischen Untersuchung herangezogen werden. Herstellung eines Zusammenhanges zwischen Grundwasser und Ackerkrume ist die erste Forderung SCHISCHKIN's, die von ROTMISTROFF wegen der ungeheuren Tiefen des Grundwassers bis zu 40 m abgelehnt wird. Als Begründung wird der begrenzte kapillare Aufstieg genommen, den ROTMISTROFF maximal mit 82 cm bezeichnet. Die Tatsache der bedeutenden Spiegelwassertiefe spricht allerdings nicht gegen eine Störung des Feuchtigkeitsaufstieges über dem Kapillarsaum, obwohl die Erörterung einer Möglichkeit des Aufstieges nur angedeutet ist (s. u.).

Für die Frage der Kondensation von Wasserdampf im Boden weist ROTMISTROFF auf Untersuchungen von GOLOWINSKI hin, der Glasgefäße in den Boden eingrub und beobachtete, wie in den Gefäßen Wasser kondensierte. GOLOWINSKI nahm an, daß dieses Wasser von dem über dem Glasgefäß befindlichen Boden aus in die Tiefe gesickert wäre und sich im Gefäß angesammelt hätte. Nachprüfungen durch ROTMISTROFF zeigten, daß ein Herabsickern un-

möglich war, weil in den über dem Glasgefäß befindlichen Schichten sich keine solche Feuchtigkeit vorfand, die der Sättigung des Bodens mit Wasser nahe kam und ein Herabfließen von hier aus ermöglicht hätte. Hier spielen Untersuchungen von FRECKMANN und BAUMANN (Berlin 1937) mit, welche die Ansicht ROTMISTROFF's bestätigen und an anderer Stelle ausgeführt sind[8]). Eine Klärung über die Herkunft des in den Gefäßen kondensierten Wassers wird nicht gebracht. Da ein Wasserabstieg abgelehnt wurde, lag es an sich nahe, von einem Feuchtigkeitsaufstieg zu sprechen. Schon W. WEISE[9]) bringt einen ähnlichen Versuch zur Darstellung und spricht von einer „Hebung der Feuchtigkeit aus tieferen Schichten", worauf bereits ausführlich hingewiesen ist.

Die Möglichkeit einer Kondensation von Wasserdampf im Boden zu flüssigem Wasser wird von ROTMISTROFF nicht abgelehnt, aber als unbedeutend hingestellt. „Bei einer unvollkommenen Sättigung des Bodens mit Wasser, und dieser Fall wird stets auf dem Felde beobachtet, ist ein gewisser Teil der Hohlräume zwischen den Teilchen mit Luft gefüllt, und der andere Teil mit Wasser. Das Wasser befindet sich infolgedessen in diesen Hohlräumen in Form einzelner, größerer oder kleinerer Tröpfchen, die voneinander durch Luft getrennt sind. Wenn kraft irgendwelcher Bedingungen eine Bewegung der im Boden enthaltenen Stoffe in einer sehr tiefen Bodenschicht nach oben entstände, so könnte sich dieser Vorgang nur auf den leichter beweglichen Teil, nämlich die Luft, beziehen, die auch durch die freien, von Wasser unbesetzten Hohlräume wandert, während die Wassertropfen auf ihrem Platz verbleiben oder infolge ihrer Schwerkraft nach unten sinken."

Augenscheinlich tritt eine Wasserbewegung in die Tiefe auf (ROTMISTROFF, Odessa 1906), die mit einer Geschwindigkeit von 15—20 cm pro Monat ermittelt sein soll. Diese Wasserbewegung wird man aber mit den von FRECKMANN und BAUMANN[10]) festgelegten Bedingungen für den Wasserabstieg in Einklang zu bringen haben. Weiter ist zu berücksichtigen, daß mit der Möglichkeit eines Wasseraufstiegs in Dampfform als einem dem entgegen gerichteten Vorgang zu rechnen wäre, für den zweifellos die Tiefe des Grundwasserspiegels und darüber befindlichen Kapillarsaumes eine ausschlaggebende Rolle spielt. Da der Grundwasserspiegel in Odessa, dem Untersuchungsgebiet von ROTMISTROFF, außerordentlich tief (bis zu 40 m) liegt, mag die Erscheinung des Wasseraufstiegs hier nur sehr mangelhaft auftreten. Aber diese russischen Verhältnisse werden den unsrigen in Deutschland nur hier und da für die praktische Bedeutung eines möglichen Wasseraufstiegs entsprechen.

Die Bildung des Grundwassers vollzieht sich nach Ansichten von ROTMISTROFF „auf Kosten des in die Tiefe durchsickernden Wassers aus Teichen und Bodentrichtern und des Schneewassers der Anforstungen", vornehmlich aber auf Kosten der Wasserüberschüsse, die nicht durch die Pflanzendecke erfaßt werden. Man wird dem zustimmen, wenn auch die Beteiligung der Teiche an der Grundwasserbildung

[8]) Vgl. S. 19 f.

[9]) Vgl. S. 14 f.

[10]) Vgl. S. 19 f.

nicht immer zu befürworten ist (E. HIRT, Halle 1937). Das spricht nicht gegen die Möglichkeit eines Wasseraufstiegs in solchen Gebieten, wo der Faktor der Versickerung außerordentlich gering ist oder fehlt.

Die unter der wurzelbewohnten Schicht des Bodens befindlichen Bereiche werden als „trockene Bodenschicht" benannt, die nur „nutzloses Wasser" enthalte. Die Bezeichnung „nutzlos" bedarf einer Begründung. Wenn mit Wasseraufstieg in Dampfform gerechnet werden darf — und diese Möglichkeit wird ja von ROTMISTROFF nicht abgelehnt —, so erscheint das Wasser dieser Schicht wohl kaum als „nutzlos", sondern es geht um Reservoire mit großer Oberfläche, die gerade für einen dampfförmigen Transport als wichtig angesehen werden könnten.

Französische Forschungen sprechen ganz besonders für unterirdische Taubildung. Da es sich um neue Berichte handelt, sei hierauf näher eingegangen.

Als Stützpunkt seiner Überzeugung von der überragenden Bedeutung der unterirdischen Taubildung führt M. ARAGOU (1935) einige nach ihm wissenschaftlich anerkannte Tatsachen und praktische Erfahrungen an. Die Diffusion erklärt er mittels der Lakhorskyschen Hypothese, daß die Erdkruste sich im Laufe von 12 Stunden um ungefähr 2 m regelmäßig hebt und senkt. Er erwähnt die Luftbrunnen der Antike, die neuerdings wieder durch Knapen angelegt werden und behauptet, daß auch die Saharabrunnen nur dank der unterirdischen Taubildung gespeist werden. Je feiner die Bodenteilchen sind, desto größer ist die wasseradsorbierende Oberfläche, um so mehr Feuchtigkeit schlägt sich aus der Atmosphäre nieder und um so mehr wird das Gedeihen der Kleinlebewesen gefördert und das Wachstum der höheren Pflanzen angeregt. Zu diesem Zweck muß jeder Boden gemäß seiner Art und je nach der Beständigkeit seiner Struktur bearbeitet und zerkrümelt werden. Denn durch Oberflächenkruste wird die unterirdische Taubildung gehemmt.

Unter Ausschluß gewisser Übertreibungen bleibt als Kern die Ansicht über die Möglichkeit einer Kondensation im Boden, für deren Feuchtigkeitsquelle dann die atmosphärische Luft zu einem guten Teil in Frage kommt, wofür ja auch die Untersuchungen von HESSELINK und HUDIG[11]) sprechen. Es mag anderseits auch Kondensation erfolgen, die das Grundwasser zum Reservoir nimmt und von hier Aufstieg bewirkt, wie das W. WEISE beobachtete und formulierte[12]). Es gibt also beide Möglichkeiten, Abstieg und Aufstieg durch Kondensation, wenn man die bisherigen Ansichten zugrunde legt.

Für den Feuchtigkeitstransport im Boden spielt die Dampfphase eine Rolle. KING (Wiskonsin 1899) beobachtete in Versuchsröhren nach Art der Laboratoriumsversuche zur Beobachtung des kapillaren Anstiegs einen Wasseraufstieg, für den er nicht allein Kapillarität, sondern auch „Wasserverdunstung und Wiederverdichtung der Dämpfe an höhergelegenen Schichten" für wahrscheinlich hält.

A. F. LEBEDEFF (Berlin 1927/28) hebt hervor: „Das Wasser kann sich, wenn die Feuchtigkeit des Bodens geringer ist als seine maximale Hygroskopizität, im Boden nur in Form von Dampf bewegen, aber

[11]) Vgl. S. 11.

[12]) Vgl. S. 14 f.

nicht als Flüssigkeit, wobei sich der Dampf aus der feuchteren Schicht in die weniger feuchte bewegt.".

„Das Häutchenwasser bewegt sich aus den feuchteren Schichten in solche mit geringerer Feuchtigkeit, wobei die Intensität der Bewegung nicht von der Schwere abhängig ist."

Nach Untersuchungen von CHR. MEZGER (1921) rufen die Dichteunterschiede im Boden selbständige, von dem Ruhe- oder Bewegungszustande der Grundluft unabhängige Dampfströmungen hervor, die sich bis in die freie Atmosphäre fortsetzen oder von dieser ausgehen können. Ihre Richtung wird stets durch das Dichtegefälle des Dampfes bestimmt; sie können also sowohl von unten nach oben als auch von oben nach unten verlaufen. Je nachdem, ob sie in der freien Atmosphäre endigen oder von ihr ausgehen, bedingen sie für den Boden einen Verlust oder einen Gewinn an Wasser. Mit den aus dem Boden ausziehenden Dampfströmungen geht eine Dampfentwicklung, mit den einziehenden eine Dampfausscheidung Hand in Hand. Im Jahresdurchschnitt kommt die Dampfausscheidung durch Kondensation der Dampfentwicklung durch Verdunstung annähernd gleich. Die unterirdischen Dampfströmungen sind daher nach MEZGER's Ansicht für das Entstehen und Vergehen des Grundwassers wie für das Maß der Bodenfeuchtigkeit und ihre räumliche Verteilung von ausschlaggebender Bedeutung.

Über Wasserdampfströmungen im Boden berichtet auch A. F. LEBEDEFF (Berlin 1927/28). Er hält trockene Bodenoberflächen für außerordentlich günstig, indem sie durch entsprechende Wasserdampfbewegungen für eine Kondensation im Boden sprechen, indem er ausführt:

„Dank ihr (der trockenen Oberflächenschicht) verliert der Boden durch den Prozeß der Verdampfung nicht nur weniger Wasser, sondern gewinnt solches noch in der trockenen Jahreszeit, wenn die Oberflächenschicht vollkommen tot zu sein scheint."

Über die Wasserdampfbewegungen als Folge der Tagesschwankungen der Temperatur im Boden bis zu 20 cm Tiefe finden wir während der Sommerzeit: „Von 4 bis 7 Uhr abends bis 7 bis 8 Uhr morgens ist der Druck des Wasserdampfes in einer Tiefe von 10 cm höher als in einer Tiefe von 5 und 20 cm. Deshalb muß das Wasser aus der Tiefe von 10 cm nach oben und unten übergehen, und diese Schicht wird deshalb trocken werden. Von 7 bis 8 Uhr morgens bis 4 bis 7 Uhr nachmittags ist die Dampfspannung in einer Tiefe von 5 cm höher als in der Tiefe von 10 cm, weswegen das Wasser aus den höheren Schichten nach unten destillieren muß. Da auch in der Oberflächenschicht eine solche Korrelation der Dampfspannungen besteht, so hat die Oberflächenschicht des Bodens eine doppelte Verdampfung, nämlich nach oben und nach unten.

Wenn das Wasser in die tieferliegenden Schichten übergeht, so kondensiert es sich in der Folge und vermehrt in ihnen den Vorrat an tropfbar flüssigem Wasser. Auf diese Weise gesellt sich der durch den Boden im Prozeß der Kondensation absorbierte Wasserdampf der Atmosphäre, wie auch das in Dampfform aus den tieferen Schichten in der vorausgegangenen Nacht übergetretene und von der Oberflächenschicht festgehaltene Wasser zu dem physiologisch nutzbaren

Wasser der tieferliegenden Schichten und steht zur Pflanzenernährung zur Verfügung. Wenn im Sommer kaltes Wetter eintritt und die Bodenoberfläche sich abkühlt, dann tritt eine Wasserbewegung in Form von Dampf aus der unteren in die obere Schicht ein."

Weiter sagt LEBEDEFF über den Wasseraufstieg: „Im Winter sind die oberen Bodenhorizonte stark abgekühlt, während die tiefen eine verhältnismäßig hohe Temperatur aufweisen. Der Temperatur des Bodens entsprechend verteilt sich auch der Wasserdampfdruck, wobei er im Winter um so größer wird, je tiefer die Schicht des Bodens liegt. Der Wasserdampf bewegt sich aus den tieferen Bodenhorizonten nach den höherliegenden und muß sich dort kondensieren."

Für die Erhaltung der Bodenfeuchtigkeit ist Bearbeitung der Bodenoberfläche wichtig. M. KRAUSE (Berlin 1931) bringt eine gute Gegenüberstellung, die zeigt, „daß wir durch eine ununterbrochene Lockerhaltung der Ackeroberfläche durch Fernwirkung die Feuchtigkeit auf tiefere Schichten künstlich beeinflussen können"[13]). Es zeigt sich bei Lockerhaltung eine geringere Verdunstung, womit die „Fernwirkung" verbunden ist.

Weiter ist mit lockerer Bodenoberfläche zweifellos eine bessere Luftzirkulation verbunden, die ja für die Bewegung der Feuchtigkeit wichtig ist. Es ergibt sich hier eine Parallele zu LEBEDEFF, der — wie bereits ausgeführt[14]) — trockene Oberflächen für eine Kondensation im Boden als günstig empfindet. Daß lockere Oberflächen gut austrocknen und dann für die darunter befindlichen Schichten einen Verdunstungsschutz bilden, ist allgemein bekannt.

M. KRAUSE (Berlin 1931) spricht von einer Hebung der Feuchtigkeit[15]). Ohne genauere Formulierung scheint bei ihm die Ansicht eines kapillaren Aufstiegs bis an die Bodenoberfläche und dort einsetzender Verdunstung vorzuliegen. Unberücksichtigt bleibt allerdings eine genauere Ausführung über die Tiefe des Grundwassers sowie über den vielleicht noch auf andere Weise stattfindenden Wasseraufstieg.

Über die Versickerung von Niederschlägen ist in letzter Zeit gearbeitet worden. Von FRECKMANN und BAUMANN (Berlin 1937, S. 127) liegen neue Untersuchungen vor, die allerdings noch nicht abgeschlossen, aber im ersten Bericht bereits von Wert sind. „Unsere Untersuchungen zeigen gerade im Zeitpunkt der höchsten Verarmung einen deutlich nach unten zu steigenden Wassergehalt." Abwärtsbewegung in auf die Wasserkapazität aufgefülltem Boden und ferner in nicht gesättigtem Boden wurden erforscht. Dabei zeigte es sich, daß auffallender Regen zunächst zur Auffüllung der obersten Schichten auf ihre Kapillarität dient. Erst wenn diese befriedigt ist, dringt das Wasser in unseren Mineralböden weiter nach unten vor. Allerdings sei einschränkend gleich betont, daß dieser Vorgang wahrscheinlich alsbald von dem beginnenden langsamen Absickern des Wassers durch den nicht voll gesättigten Boden überdeckt wird. Es müßte ein starker Regen tiefer in den Boden eindringen, „je feuchter dieser und je geringer seine Wasserkapazität ist".

Belegt wird diese Erscheinung durch die Tatsache, daß bei bewachsenem Boden in den oberen Schichten mehr Niederschlagsmengen durch

[13]) Vgl. S. 462, Berlin 1931. [14]) Vgl. S. 20. [15]) Vgl. S. 665, Berlin 1931.

Feuchtigkeitsbestimmungen nachweisbar sind als in unbewachsenem Boden, wo ein Absickern nach unten erfolgt, wenn die Kapazität befriedigt ist, was hier wegen Feuchtigkeitsreserven schneller erfolgen kann.

Die Rekondensationszone wird an ihrer Basis durch den Kapillarsaum begrenzt, wobei ein gewisser Übergang in den Rekondensationsraum in Gestalt des Porenwinkel- und Haftwassers erfolgt. Von einer absoluten oberen Begrenzung darf nicht gesprochen werden. Die bei W. KOEHNE als Bodenzone benannten Bereiche gehören ohne jeden Zweifel auch dem Rekondensationsraum an; es wird lediglich mit einem Schwanken der oberen Begrenzung als Folge von Niederschlägen zu rechnen sein.

F. DIENERT (Compt. rend. Académie d'Agriculture France, 1934) ist der Ansicht, daß die Feuchtigkeit unter gewissen Umständen von der Oberfläche des Bodens aus in Bewegung gesetzt werden kann und sich in der Tiefe kondensiert, wo sie dann mehr oder weniger die Grundwässer speist. Vielleicht wird diese Bewegung des Wasserdampfes von oben nach unten gefördert, wenn durch Steigerung des atmosphärischen Druckes die Luft in die Tiefen des Bodens eindringt.

Durch die Ausführungen wird ersichtlich, daß für die Frage der Rekondensation und der damit verbundenen Bewegungsmöglichkeiten der Bodenfeuchtigkeit genauere Beobachtungen nötig werden, die einen Maßstab für die Bedeutung der Erscheinungen bringen. Der zweifellos übertriebenen Kondensationstheorie, der kein Wasserkonsum, sondern eine Wasseranreicherung zugeschrieben wird, stehen insbesondere in Laienkreisen entgegengesetzte Meinungen gegenüber, die jede mengenmäßige Bedeutung ausschließen. Meist beruhen sie auf einer Täuschung, indem der Erdboden nach kürzeren oder längeren Trockenperioden auch in größeren Tiefen als „staubtrocken" bezeichnet wird. Denn beim Graben wird unmittelbar von der trockenen Oberfläche her Staub mitgerissen, der sich auf den feuchteren Boden der größeren Tiefe setzt und hier die eigentliche Bodenbeschaffenheit verdeckt.

Bisher durchgeführte Versuche

Über die Kapillar- und Rekondensationserscheinungen und damit im Zusammenhang über die Temperaturschwankungen im Erdboden liegen Untersuchungen vor, deren Kenntnis für eine weitere Erörterung des gesamten Fragenkomplexes von grundlegender Bedeutung wird.

Zur Untersuchung der Kapillarität und ihrer Abhängigkeit von der Korngröße des Gesteins werden für gewöhnlich 100 bis 200 cm lange Glasröhren mit einem Durchmesser von ca. 2 cm an ihrem unteren Ende mit einem dichten Gewebe verschlossen, mit trockenem Boden gefüllt und in Wasser eingetaucht. Der Wasseraufstieg läßt sich durch verschiedene Färbung des trockenen und nassen Bodens gut verfolgen. Nach 24 Stunden oder wenig mehr findet angeblich im allgemeinen kein kapillarer Anstieg mehr statt, so daß dann die Kapillarität ermittelt werden kann.

Auf dem Wege dieser Untersuchungen werden von ATTERBERG[16])

[16]) Nähere Ausführungen sind zu finden bei ATTERBERG (1905 und 1908) sowie bei SCUPIN (1933, S. 31). Vorschläge für praktische Nutzanwendung der Kapillarität sind zu finden bei E. MEIER (Leipzig 1935) und J. BORDAS (Berlin 1932).

Angaben gemacht, die man im allgemeinen als gültig betrachtet. Da man seinen Daten zweifellos eine theoretische Bedeutung beimessen muß, die nichts mit der Ablehnung des Versuchsverfahrens zu tun hat, weil sie das Verhältnis zwischen Korngröße und kapillarem Anstieg berücksichtigen, seien seine Ergebnisse für Sandboden hier kurz genannt:

Korndurchmesser:		Anstieg:
5,00—2,00 mm	—	25 mm
2,00—1,00 mm	—	66 mm
1,00—0,50 mm	—	131 mm
0,50—0,20 mm	—	246 mm
0,20—0,10 mm	—	428 mm
0,10—0,05 mm	—	1055 mm
0,05—0,02 mm	—	1860 mm

Man wird fragen müssen, ob diese auch den ATTERBERGschen Untersuchungen zugrunde liegenden Bedingungen Aufstiegsmöglichkeiten schaffen, wie sie in der Natur vorliegen, und ob die Untersuchungen damit ein wirklich anschauliches Bild vermitteln.

Einen Hinweis auf die teilweise Unzulänglichkeit der Verwendung von Röhren, der älter als die ATTERBERGschen Untersuchungen ist, gibt bereits VON KLENZE (Berlin 1877). Er schreibt: „Den bisher angestellten derartigen Versuchen ist meist der Vorwurf zu machen, daß zu enge Röhren benutzt werden. Wenn in solchen nun auch die Kapillarwirkung der gläsernen Röhren selbst = 0 genannt werden kann, so ist es doch sehr schwierig, in einem so engen Raume auch nur annähernd ein gleich dichtes und soviel als möglich natürliches Gefüge des Bodens herzustellen. Referent schreibt es diesem Umstande hauptsächlich zu, wenn manche bisher angestellte Versuche Resultate ergeben haben, welche den wirklichen Verhältnissen der Natur nicht entsprechen."

Die von KLENZE kritisierten Röhren wiesen einen Durchmesser von ca. 17 mm auf. Er selbst verwendete Röhren von 35 mm Weite und glaubte, hiermit eine Beseitigung der Fehlerquellen herbeizuführen.

Seine Untersuchungen erstrecken sich im allgemeinen über 96 Stunden. Ob in dieser Zeit bereits mit einem Abschluß des kapillaren Anstiegs gerechnet werden darf, mag dahingestellt bleiben. Weiter mag die Frage aufgeworfen sein, ob nicht im gewachsenen Boden bis zu einer bestimmten Tiefe mögliche Temperaturschwankungen Einfluß auf den kapillaren Anstieg haben, weil hier vielleicht eine Förderung durch Wasseranreicherung auf dem Wege der Kondensation angenommen werden darf. Schließlich wird auch trotz erhöhter Weite der Untersuchungsrohre noch keinesfalls mit einer den natürlichen Bedingungen entsprechenden Bodenstruktur zu rechnen sein. Trotzdem sind die erzielten Werte bei verschiedenem Bodenmaterial Vergleichzahlen, die zweifellos ihre Bedeutung haben.

Auf die Bedeutung von festem und lockerem Boden für den kapillaren Anstieg weist SCHLEH (Leipzig 1876) hin, der ermittelte, daß in einem festen Boden mit einem um durchschnittlich 18—20% höheren

kapillaren Wasseraufstieg zu rechnen ist als im lockeren Boden. Dieses Verhalten ist ja auch ohne weiteres erklärlich, weil im festen Boden feinere Kapillaren als im lockeren vorliegen.

KLENZE bringt einige Angaben über die maximale kapillare Steighöhe, wobei jedoch leider eine genauere Bezeichnung über die Korngröße des Materials fehlt. Seine Ergebnisse beziehen sich auf Röhrenversuche. Im Quarzsand liegt die maximale Steighöhe bei 145 cm, bei Kaolin findet eine weitere Steigerung statt, die bis 187 cm reicht. Das Maximum für Torf findet er bei 47,9 cm.

Auch über die kapillare Wasserleitung von oben nach unten finden wir bei KLENZE genauere Ausführungen. Er gibt an, daß die kapillare Leitung im Boden von oben nach unten langsamer als von unten nach oben erfolgt. Das Sinken des Wassers geht schneller vor sich, wenn nicht kapillare Räume im Boden enthalten sind. Für Quarz wird eine maximale Tiefe von 89 cm, für Kaolin von 92,8 cm und für Torf von 94 8 cm erreicht.

Über die kapillare Bewegung des Grundwassers finden sich bei H. HELLRIEGEL (Braunschweig 1883) wichtige Feststellungen, die auch heute noch gültig sind. Auf Grund verschiedenster Untersuchungen konnte ermittelt werden, daß bei Böden verschiedener Korngröße ein Feuchtigkeitsübertritt vom grobkörnigen zum feinkörnigen Boden stattfindet, den man als Folge einer gewissen Saugwirkung vom feinkörnigeren Material anzusehen hat, die wegen hier größerer Kapillarkräfte notwendig vorliegt.

Obwohl die Versuche von H. DAMMANN (Berlin 1905) auch in Glasröhren von 20—25 mm Weite ausgeführt wurden, lieferten sie wichtige Ergebnisse. DAMMANN's Versuchsrohre von 150 cm Länge füllte er mit trockenem Bodenmaterial verschiedenster Beschaffenheit; gleichzeitig wurde eine Füllung mit gleichmäßig mit Wasser durchtränktem Boden vorgenommen, um über den kapillaren Aufstieg zwischen beiden Fällen Vergleiche zu ziehen.

Es ergibt sich für den feuchten Boden ein schnellerer kapillarer Anstieg als im trockenen Material. Nach einer gewissen, vom Material abhängigen Steighöhe läßt die Steiggeschwindigkeit im feuchten Boden nach, während dann der kapillare Anstieg im trockenen Boden überwiegt.

Die Menge des kapillar gehobenen Wassers ist beim angefeuchteten Boden geringer als beim trockenen. Das liegt an einer teilweisen Ausfüllung der Porenräume, die zugleich auch feinere Kapillarröhren bedeutet und hier aus diesem Grunde einen zunächst intensiveren Anstieg bringt, der dann bei Erreichung der kapillaren Anstiegsgrenze verlangsamt wird.

E. KRÜGER findet durch seine Untersuchungen (Breslau 1925) bestätigt, „daß jede Bewegung von Wasser im Boden mit der Feinheit des Bodenkorns abnimmt . . ." Er wirft den neuen Gedanken auf, daß für die Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransportes die Oberfläche der Bodenteilchen maßgebend ist. Mit größer werdender Oberfläche nimmt die Wasserbewegung ab.

Diese Feststellung über die Oberfläche der Bodenkörnchen hat zweifellos bei gleichartigem Bodenmaterial als grundlegend zu gelten.

Auf diesem Wege werden hier wichtige Vergleichsmomente möglich sein. Bei verschiedenem Material komplizieren sich die Bedingungen, indem jeweils die Materialabhängigkeit als weiterer Faktor hinzukommt.

Die Röhrenmessungen erstrecken sich — wie bereits gezeigt — bis zu 96 Stunden. Im Hinblick auf die natürlichen Bedingungen ist das eine zu kurze Zeit, die im Grunde für hydrologische Vorgänge bei relativ großen Mengen, wie sie für die Kapillarität in Frage kommen, außerordentlich wenig bedeutet. Es ist keinesfalls gesagt, daß durch einen sichtbaren Stillstand ein Beweis für den Endzustand des kapillaren Aufstiegs angezeigt wird. Es kann eine bedeutende Verlangsamung vorliegen oder eine Vorwirkung des Porenwinkelwassers stattfinden, der ein weiterer kapillarer Aufstieg folgt. Es bleibt ferner zu überlegen, ob nicht durch die täglichen Temperaturschwankungen, die in der Natur mit einer gewissen Rhythmik vorliegen, die aber im Laboratorium weniger auftreten, eine Förderung des Wasseraufstiegs bedingt sein könnte. Endlich haben wir in der Natur keine irgendwie herausgetrennten Bodensäulen, sondern einen weiten Raum, für den gewisse Luftbewegungen von Belang sein mögen.

Deshalb ist es wichtig zu erfahren, daß E. A. MITSCHERLICH (Berlin 1923, S. 141) berichtet: „In einem Vierteljahre habe ich hier bei den verschiedensten Bodenarten keinen höheren Anstieg als 0,8 m beobachten können. N. TULAIKOW beobachtete in 513 Tagen eine maximale Steighöhe von 1,35 m. bei feinkörnigen Bodenarten eine solche von 0,60 bis 0,70 m." Von Einfluß wird hierbei auch das Bodenmaterial gewesen sein.

Trotzdem die Methodik der bisherigen Untersuchungen als unbedingt fragwürdig angesehen werden muß, wird sie wieder in neuester Zeit von W. BRAUN (Ochsenfurt 1933) herangezogen. Ganz von der bereits kritisierten Arbeitsweise abgesehen, wird die mögliche Bedeutung des sogenannten Zwischenstreifens oder besser Rekondensationsraumes nicht diskutiert, sondern vielmehr ausgeführt:

„Befindet sich der Grundwasserspiegel in solcher Tiefe unter der Bodenoberfläche, daß das Grundwasser im Boden kapillar bis zu den Pflanzenwurzeln gehoben werden kann, so bildet dieses einen außerordentlich wertvollen Feuchtigkeitsspeicher für die Vegetation. Fällt er je nach der Kapillarität des Bodens und der Bewurzelungstiefe der Pflanzen tiefer als 1.5 bis 4 m unter die Bodenoberfläche, so ist das Grundwasser für die Vegetation wertlos, und die Pflanzen können trotz seines Vorhandenseins unter Trockenheit leiden ..."

BRAUN gibt auch Untersuchungen über künstlichen Regen. Die Regenversuche wurden so durchgeführt, daß eine bestimmte, sich aus den örtlichen Niederschlagsmengen ergebende Wassermenge in das Versuchsrohr eingegossen und dann der Abstieg beobachtet wurde.

Auch dieser Versuch kann nicht befriedigen, da er den natürlichen Bedingungen nicht entspricht. Der Faktor der Verdunstung kommt so gut wie überhaupt nicht, der Faktor des Abflusses gar nicht zum Ausdruck. Das aber sind zwei Momente, die eine wesentliche Minderung der wirksamen Niederschlagsmengen ausmachen[17]).

H. SCUPIN (Halle 1935 b) gibt ein Feuchtigkeitsprofil an, das im Zusammenhang mit einer Bohrung gewonnen wurde. Er nennt den

[17]) W. ULE, Stuttgart 1897, S. 49.

Wassergehalt in Gewichtsprozenten und zeichnet damit so bedeutende Feuchtigkeitsmengen über dem Kapillarsaum auf, daß diese Werte einen ersten und vor allem sehr wichtigen Anhaltspunkt für die Wasserverhältnisse im Rekondensationsbereich vermitteln. Der Feuchtigkeitsgehalt ist, bezogen auf eine Schicht von jeweils 10 cm Stärke, im Mittel:

Bohrprofil: 0,00—2,55 m: Mutterboden und sandiger brauner Lehm,
2,55—4,35 m: Toniger grauer Sand, bei 3,65 m Wasser.

Feuchtigkeitsprofil:

0,10—0,20 m	13,86% H_2O
0,35—0,45 m	13,41%
0,60—0,70 m	8,69%
0,80—0,90 m	17,38%
1,00—1,10 m	17,42%
1,20—1,30 m	16,74%
1,45—1,55 m	15,42%
1,65—1,75 m	18,17%
1,85—1,95 m	12,80%
2,05—2,15 m	17,63%
2,25—2,35 m	20,61%
2,50—2,60 m	24,56%
2,70—2,80 m	24,27%
2,90—3,00 m	25,41%
3,10—3,20 m	26,18%
3,30—3,40 m	30,96%
3,55—3,65 m	25,68%

Die Feuchtigkeitsmengen im Rekondensationsraum sind beträchtlich und überwiegen ganz wesentlich, wie H. SCUPIN zeigt, die zur Verfügung stehenden Niederschlagsmengen, die als Feuchtigkeitsbildner entgegengehalten werden können. Zudem ist durch die Vegetation mit einem ständigen Wasserverbrauch zu rechnen, der je nach dem Einzelfall als mehr oder weniger bedeutend angesetzt werden muß. Es bleibt rein auf Grund dieser Überlegungen ein Feuchtigkeitsaufstieg in überwiegendem Maße.

In einer weiteren Arbeit weist H. SCUPIN (Halle 1937) nach, daß ein rechnerischer Beleg für die Unmöglichkeit einer ausschließlichen Bildung des Wasservorrates von außen her gebracht werden kann. Nach Untersuchungen von ULE (Stuttgart 1897) im Saalegebiet ergibt sich für die wirksamen Niederschlagsmengen ein so geringer Wert, daß hiermit die Bodenfeuchtigkeit nicht geklärt werden kann. Denn es liefert ein praktischer Fall zwischen 30 und 50 cm Tiefe nach H. SCUPIN (Halle 1937) einen durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehalt von 14,04%, dem eine Porenfüllung von etwa 42% entspricht bzw. eine Wassersäule von 107 mm zukommt. Diese Zahl, bezogen auf 20 cm Boden, liefert bereits ⅓ der gesamten Niederschlagsmenge eines Jahres. Da nur ein geringer Niederschlagsteil versickert[18]) und mit den 20 cm nur ein Bruchteil des Bodens überhaupt erfaßt wird, der ja über dem Grundwasser im allgemeinen mehrere Meter mächtig ist, muß ein weiterer Wasserlieferant herangezogen werden.

[18]) ULE kommt für Mitteldeutschland zu dem Ergebnis, daß 50% der Niederschläge durch Verdunstung verlustig gehen, 30% abfließen und versickern und 20% dem Vegetationsverbrauch zukommen.

Mit einem seitlichen Zustrom ist nicht zu rechnen, wie das PFEFFER (Halle 1908) zum Ausdruck brachte, da die Vertikalkomponente eine ausgedehnte Horizontalbewegung niemals zulassen würde. Hiermit rückt die nähere Untersuchung eines Wasseraufstiegs von unten her stark in den Bereich der Betrachtungen.

Ein überzeugendes Beispiel für die mengenmäßige Bedeutung der Kondensationsvorgänge legt M. v. WRANGELL (Berlin 1927 und Berlin 1929) dar, wobei allerdings gerade künstliche Feuchtigkeitsanreicherung durch Verdunstungsschutz mitspielt und so den Vorgang anschaulich werden läßt. Es wurde der Erdboden mit ungeteerter Dachpappe bedeckt, in die entsprechend einem als Versuchsobjekt anzubringenden Pflanzenmaterial Öffnungen geschnitten wurden. Damit erreichte man, daß die Pflanze normal im Erdboden verankert war, aber die Erdoberfläche mit Ausnahme der Pflanzenumgebung nicht freilag. Der Versuch zeigte ein außerordentlich wertvolles Ergebnis mit praktischer Bedeutung:

Obwohl an sich kein Niederschlag unmittelbar zugeführt wurde[19]), bildeten sich die Pflanzen besser aus, als andere auf nicht mit Dachpappe belegten Beeten. Der Ernteertrag wurde nicht nur bis zu 25% größer, sondern es trat auch eine schnellere Reife ein.

Es zeigte sich z. B., daß sich unter der Dachpappe während der Morgenstunden eine so bedeutende Wasseransammlung gebildet hatte, daß das Wasser von der Dachpappe sogar abtropfte. Zum Teil zeigten die Pflanzenwurzeln ein negativ geotropisches Wachstum, d. h. sie wuchsen aus dem Erdboden heraus, dem Wasser zu.

Verdunstungsschutz und durch stärkere Temperaturschwankungen wesentlich vermehrte Taubildung in den oberen Bodenanteilen führten zu einem höheren Wassergehalt dieser Bodenschicht als auf unbedeckten Teilstücken.

Diese hydrologische Erscheinung mit ihrem landwirtschaftlichen Nutzeffekt bringt dazu eine verbesserte Entwicklung der Bodenbakterien, Bewahrung der ursprünglichen Bodenstruktur und gärtnerische Vorteile (Mehrertrag, kein Gießen, kein Unkraut). Die Kohlensäure wird den Pflanzen direkt zugeführt, da sie nur dort aus dem Boden entweichen kann, wo die Pflanzen wachsen, d. h. keine Bodenbedeckung vorliegt.

Wenn Vermehrung im Boden durch Kondensation vorliegt, so muß das durch ein Nichtausreichen der Niederschläge zum Ausdruck kommen. H. HELLRIEGEL (Braunschweig 1883, S. 755) berichtet: „Der Regen, der im Durchschnitt der Jahre fällt, führt an vielen Punkten der Erdoberfläche dem Boden während der Vegetationszeit der Gewächse nicht so viel Wasser zu, daß der Bedarf derselben ganz dadurch gedeckt würde." Allerdings gibt HELLRIEGEL keine nähere Klärung, insbesondere auch keine mengenmäßigen Angaben über einen etwaigen Wasserzuschuß vom Grundwasser, d. h. von unten her, sowie von gespeicherter Winterfeuchtigkeit.

H. SCUPIN (Halle 1937) und G. ISERT (Halle 1937) eröffneten die

[19]) Ein gewisses Eindringen von Niederschlägen in der Pflanzenumgebung liegt natürlich vor, wenn es auch nicht über die ganze Breite der Beobachtungsfläche erfolgt. Es ist durch die in der Dachpappe angebrachten Öffnungen bedingt.

Möglichkeit einer mathematischen Berechnung des Fehlbetrages, wodurch die Problematik gut zum Ausdruck kommt, ohne allerdings zunächst hiermit eine sofortige Lösung zu erfahren, die auch über den Rahmen dieser Arbeiten hinausgehen würde.

Die Rekondensationserscheinungen im gewachsenen Boden werden eng an die Temperaturverhältnisse geknüpft sein. Es wird besonders dort mit einer Wasseranreicherung im Boden zu rechnen sein, wo Temperaturschwankungen vorliegen, die im Tages- und Jahresrhythmus sowie bei plötzlichen Erscheinungen auftreten, wenn zwar auch die nach LEBEDEFF und MEZGER zitierten Ansichten[20]) über mögliche Dampfströmungen und die Darstellungen von WEISE[21]) nicht unmittelbar für eine Bindung an tiefer eindringende Temperaturschwankungen sprechen. Es ist wichtig, kurz über die Temperaturverhältnisse in gewachsenem Boden zu berichten.

Bei R. SÜRING (Berlin 1919) finden sich über Temperaturschwankungen bis zu 20 cm Tiefe folgende Angaben:

„Bei 20 cm Tiefe macht sich die Wirkung der Sonnenstrahlen auf die Erwärmung der obersten Bodenschichten namentlich in dem raschen Anwachsen der Temperaturamplitude während des Frühjahrs bemerkbar. Vom Februar bis Mai vergrößert sie sich auf das 5,5fache und erreicht das Maximum; sie sinkt dann langsam wieder und erreicht im November denselben Betrag wie im Februar. Der langsame Abfall der Amplitude im Laufe des Sommers zeigt sich noch deutlicher bei den größten Amplituden der einzelnen Monate. Im Mittel 1910 bis 1916 betrugen die Maximalamplituden im

Mai	Juni	Juli	August	September
7,8°	7,7°	7,4°	6,8°	5,6°

Die absolut größte Tagesschwankung hatte der 15. Juni 1913 mit 8,7°. Die Temperaturmaxima treten fast immer im Juli ein ..."

Von besonderem Interesse sind die Minima- und Maximawerte, die SÜRING für die einzelnen Monate als Durchschnitt feststellte.

Monat	Minimum	Maximum
Januar	— 4,3	4,0
Februar	— 4,0	5,4
März	— 0,3	10,4
April	2,3	18,4
Mai	7,8	23,1
Juni	12,5	25,7
Juli	14,5	27,0
August	13,9	25,4
September	8,4	21,0
Oktober	3,2	13,4
November	— 0,1	8,7
Dezember	— 0,6	5,9

[20]) Vgl. S. 19 f. und S. 18.
[21]) Vgl. S. 14 f.

Diese Werte beziehen sich auf Beobachtungen in der Gegend von Potsdam. Als besonders wertvoll sind die zeitlichen Feststellungen, die die Werte angeben für die Zeitdauer, daß das Temperaturmaximum eines Tages von der Erdoberfläche bis zu 20 cm Tiefe gelangt; ebenso sind Angaben über die Zeit der Einstellung des Minimums in 20 cm Tiefe von Interesse. Hierüber gibt SÜRING für Potsdam und einige andere Orte folgende Werte an:

Ort	Minimum	Maximum
Potsdam	3,3h	3,7h
Pawlowsk	4,7h	5,0h
Nukuß	5,1h	7,0h
Belgrad	5,0h	6,1h
Tiflis	5,0h	6,3h

Es zeigt sich, daß die Einstellung des Minimums kürzere Zeit als die Erreichung des Maximums benötigt. Ausschlaggebend für diese Zeiten ist die Bodenbeschaffenheit, die sich wie folgt ergibt:

Ort	Bodenbeschaffenheit
Potsdam	feiner, ziemlich reiner Quarzsand.
Pawlowsk	reiner, feinkörniger Quarzsand.
Nukuss	gleichförmig trockener sandiger Lehm oder Ton.
Belgrad	humoser Boden.
Tiflis	schwarzer Sand, gemischt mit Ablagerungsgeröll.

Die Leitfähigkeit des Bodens für Temperatur darf nicht als konstant betrachtet werden. Es spielen vielmehr verschiedenste Faktoren wie Niederschlag, Dürre usw. eine gewisse Rolle. Niederschlag kann die Temperaturleitfähigkeit erhöhen, weil nasser Boden die Temperatur besser leitet als trockener. Im trockenen Boden wird wiederum die Übertragung der Temperatur durch Konvektion besser erfolgen als in feuchtem und festem Boden, so daß hier die Bodenluft eine besondere Rolle spielt.

Werte über Temperaturschwankungen finden wir bei C. KASSNER (Berlin 1902). Für das Tagesmaximum und -minimum ergeben sich für verschiedene Bodentiefen für Pawlowsk im August 1888 folgende Schwankungen:

Zone	Maximum	Minimum	Schwankung
Erdoberfläche	27°	10°	17°
2 cm Tiefe	25°	11°	14°
5 cm Tiefe	21°	12°	9°
10 cm Tiefe	20°	13°	7°
20 cm Tiefe	17,5°	13,5°	4°
40 cm Tiefe	15,5°	14,5°	1°

Diese Werte sind Tagesmittel für den Monat August. Sie veranschaulichen auf jeden Fall, daß für die Tiefe von 40 cm mit täglichen Schwankungen zu rechnen ist, geben jedoch noch keine absoluten täglichen Beträge, so daß sie einen endgültigen Schluß nicht zulassen.

Jahresschwankungen sind bei Potsdam bis in 12 m Tiefe gemessen worden, wo eine Differenz von 0,51° bestimmt wurde.

KASSNER spricht von Wärmeströmungen im Erdboden, die dem mit den Temperaturschwankungen im Boden erfolgenden Wärmeausgleich entsprechen. KASSNER gibt sie wie folgt an:

Im Sommer tritt die Wärme von oben ein, verzögert aber ihr Fortschreiten mit wachsender Tiefe immer mehr. In den Monaten März bis Mai und im September kommt der von oben her eindringenden Wärme ein Wärmestrom von unten entgegen. Im Oktober bis Februar liegt nur eine aufwärts gerichtete Wärmeströmung vor, im Juni bis August nur eine abwärts gerichtete Wärmebewegung, bezogen auf eine Bodentiefe bis zu 6 m in der Gegend von Potsdam.

Eine neuere Angabe über die Tiefenreichweite täglicher Schwankungen geben amerikanische Forschungen, die von FITTON und BROOKS (1931) zusammengetragen wurden. Die von 32 Stationen der Union eingeholten Daten ergaben: Im gleichen Sinne schwanken die Temperaturen der Luft und der oberflächennahen Bodenschichten. Die tägliche Schwankung der Bodentemperatur erstreckt sich bis zu etwa 90 cm Tiefe, die jährliche aber ist noch in 3 m Tiefe und mehr zu erkennen.

Im Winter können sich durch Schneebedeckung Differenzierungen ergeben. Es ist eine allgemein bekannte Tatsache, daß die Schneedecke für den unter ihr befindlichen Boden einen gewissen Wärmeschutz darstellt. EBERMAYER (Berlin 1873) ermittelte, daß z. B. trotz ca. — 20° R Kälte unter der Schneedecke in 30 cm Tiefe etwa + 1° R und in 120 cm Tiefe etwa + 4,8° R vorlagen und diese Temperaturen bei 14tägiger Meßzeit fast unverändert blieben. WOLLNY (München 1879) macht allgemeine Angaben über die Bodentemperatur, wobei sich seine Beobachtungen gleichzeitig auf ein mit Schnee bedecktes und schneefreies Feld beziehen.

„1. Bei Frostwetter ist der schneebedeckte Boden beträchtlich wärmer als der nackte.

2. Bei plötzlichem Steigen der Lufttemperatur über 0° erwärmt sich der von Schnee befreite Boden schneller als der schneebedeckte.

3. In letzterem sind die Temperaturschwankungen bedeutend geringer als im nackten. Schon unter einer mäßig starken Schneedecke erhält sich die Bodentemperatur außerordentlich gleichmäßig und sinkt selten so tief, daß ein nachteiliger Einfluß auf etwa angebaute Kulturpflanzen eintreten könnte.

4. Die Schneedecke wirkt daher nach zwei Richtungen schützend auf die Vegetation, einmal indem sie die Kälte vom Boden abhält und sodann, indem sie grelle Temperaturschwankungen teils während des Bedecktseins, teils während des Auftauens abschwächt."

Von J. KERÄNEN (Helsingfors 1920) liegen neuere Untersuchungen vor, die in Sodankylä durchgeführt wurden. Allerdings muß dabei berücksichtigt werden, daß in diesen Teilen des nördlichen Finnlands durchschnittlich über 7 Monate eine Schneedecke zu finden ist.

Es zeigte sich, daß die Temperaturen unterhalb des Schnees bereits in 160 cm Tiefe nach der Schneeschmelze lange Zeit, z. T. mehr als einen Monat ziemlich konstant um 0—2° blieben, während eine Lufttemperatur von 12° und mehr herrschte. Es findet also erst ein langsames Auftauen und insbesondere eine nach und nach einsetzende Mobilität der gespeicherten Winterfeuchtigkeit statt.

Die Feststellungen von BRAZIER und EBLE (1935) haben dargelegt, daß bei Sinken der Temperatur das Bodenwasser gefriert und solange, bis es gefroren ist, ein weiteres Sinken der Temperatur verhindert. Außerdem kondensiert sich Wasserdampf aus verschiedenen Bodentiefen in den kältesten Schichten. Beim Wiederauftauen fordern die Bodenschichten Wärme zum Auftauen ihres gefrorenen Wassers, dessen Menge noch aus Kondensation aus tieferen Schichten während des Gefrierens gestiegen ist. So bilden die oberen Schichten des Bodens mit ihrer Feuchtigkeit eine Art Schutzwand gegen raschere Temperaturänderungen.

Die insgesamt für den Fragenkomplex der Rekondensation und Kapillarität vorliegenden Vermutungen und Untersuchungen sind außerordentlich vielseitig und ebenso verschiedenartig. Sie eröffnen wohl die Problematik, lassen jedoch eine restlose Lösung nicht zu. Deshalb liegt es nahe, nach weiteren Untersuchungsmethoden zu fragen. Dazu wurden chemische und physikalisch-hydrologische Methoden herangezogen, mit denen sich die folgenden Erörterungen zu befassen haben.

Chemische Untersuchungsmethoden

Unsere strukturelle Gliederung des Erdbodens über dem obersten Grundwasserstockwerk bedarf eines Beleges, um die zunächst theoretisch erfolgten Erörterungen zu fundieren. Diesen Nachweis geben wir vorerst auf chemischem Wege. Dazu wurde folgender Versuch vorgenommen:

Die Tiefe des Grundwasserspiegels war in einem bestimmten Bereich durch die Anlage eines Brunnens mit 3,15 m bekannt. In unmittelbarer Nähe des Brunnens wurde eine 2,50 m tiefe Grube angelegt. Bei der Tiefe von 2,37 m war der Kapillarsaum erreicht, wie durch eine entsprechende Kontrolle festgestellt werden konnte.

Aus verschiedenen Tiefen wurden Bodenproben[22]) entnommen und ihr Wassergehalt ermittelt. Es ergab sich für 81,7 g Boden aus ca. 50 cm Tiefe ein Wassergehalt von 6 g, für 88,3 g Boden aus ca. 1 m Tiefe 10 g Wassergehalt, für 89,6 g Boden aus ca. 2,20 m Tiefe 6 g Wassergehalt und für 53,7 g Boden aus 2,40 m Tiefe 20 g Wassergehalt. Der Wassergehalt war

in	50 cm Tiefe	7,3%	
	100 cm Tiefe	11,3%	
	220 cm Tiefe	6,7%	
	240 cm Tiefe	37,2%	(Kapillarzone).

Zu diesen genau festgelegten Bodenmengen wurden jeweils 100 ccm

[22]) Für die Untersuchung ist es wichtig zu wissen, daß die Proben aus einem nichtgedüngten und nichtbewachsenen Bezirk entnommen werden, so daß mit ungestörten natürlichen Bedingungen gerechnet werden kann.

dest. Wasser gegeben, die Behälter mit Paraffin luftdicht verschlossen und der Boden während einer Zeit von 2 Wochen ausgelaugt. Dadurch mußten alle in der Bodenfeuchtigkeit löslich vorhandenen Bestandteile herausgezogen werden und auf einfachem analytischem Wege nachweisbar geworden sein. Beim Nachweis blieb lediglich die Verdünnung des Bodenwassers zu berücksichtigen, die durch den Zusatz der 100 ccm dest. H_2O erfolgt war. Darüber hinaus mußte damit gerechnet werden, daß aus dem festen Bodenanteil unter stärkerem H_2O-Einfluß Stoffe zusätzlich gelöst wurden, die nicht aus dem Grundwasser stammten. Bei einer Störung des Versuchsergebnisses würden hierbei unter Umständen auffallende Unregelmäßigkeiten auftreten.

Nach der Auslaugung, die durch mehrfaches Schütteln der Behälter beschleunigt und möglichst hochprozentig gehalten werden konnte, wurde gewartet, bis sich der Boden in den Behältern gesetzt hatte, und die darüber stehende Wassermenge abgegossen sowie filtriert. Es erfolgten dann quantitative Bestimmungen auf Fe, Mn, SO_4, SO_3, SiO_2 und H_2SiO_3, die nach Angaben von W. OLSZEWSKI (Berlin 1925, S. 74/82) durchgeführt wurden. Mangan war nicht nachzuweisen und wurde auch nicht in Spuren angetroffen, so daß in den weiteren Ausführungen Mn nicht zu berücksichtigen ist.

Es ist wichtig zu erwähnen, daß auch aus dem Brunnen zur Zeit der Entnahme der drei Bodenproben eine gewisse Wassermenge abgepumpt wurde, die als Grundwasser für den Versuch von Bedeutung war und ebenfalls quantitativ auf die genannten Bestandteile untersucht wurde.

Die Auswahl der zu prüfenden Substanzen hat jeweils nach chemisch-geologischen Gesichtspunkten zu erfolgen. Für ihre Herkunft sind nicht allein Grundwasser, sondern ebenso Einfluß von oben her verantwortlich zu machen, wenn Düngung, Vegetation usw. vorliegen. Es wird schwer sein, die betreffenden Stoffe im voraus zu bestimmen.

Der geschilderte Versuch lieferte für die genannten Bodenproben folgende Werte (Kapillarsaum bei 237 cm):

Tiefe	Gehalt in mg/Liter für					
	Fe	Mn	SO_4	SO_3	SO_2	H_2SiO_3
50 cm	0,0009		7,46	3,22		
100 cm	0,00125		19,2	16,5	Spuren	Spuren
220 cm	0,0008		1,48	1,07		
240 cm	0,0042		212,3	121,1	6,13	7,91
Grundw.	0,0037		204,8	119,6	6	7,8

Die Analyse zeigt ein recht interessantes Ergebnis. Zunächst ist ersichtlich, daß wir im Kapillarsaum durchweg eine bestimmte Anreicherung der gelösten und hier untersuchten Substanzen finden. Infolge der Regelmäßigkeit dieser Erscheinung werden wir unseren Befund verallgemeinern dürfen, indem wir sagen, daß alle im Grundwasser gelösten Stoffe im Kapillarsaum eine Anreicherung finden, die wir folgendermaßen zu erklären haben:

Über dem Kapillarsaum finden wir in gewisser Weise eine Mobil-

zone, die vom Kapillarwasser gespeist wird. Es erfolgt hier eine ständige Verdunstung von Kapillarwasser, das dann auf dem Wege der Rekondensation weiter befördert wird. Das muß eine Konzentration der gelösten Stoffe im Bereich der oberen Grenze des Kapillarsaumes nach sich ziehen. Es handelt sich also um eine Anreicherung von löslichen Stoffen, die dort erfolgt, wo das Wasser verdunstet, um einen sogenannten Verdunstungshorizont.

Bereits WOLLNY (Heidelberg 1884) bringt hierüber zum Ausdruck: „Wird der an der Oberfläche des Bodens stattfindende Feuchtigkeitsverlust durch kapillares Aufsteigen des Wassers wieder ersetzt, so wird ein Teil der löslichen Bodensalze nach aufwärts gefördert."

Im Rekondensationsbereich hätten wir an sich nach unseren früheren Darlegungen eigentlich keine gelösten Stoffe zu erwarten, die aus dem Grundwasser stammen. Und doch finden wir hier eine gewisse Menge, die schließlich in der Nähe der Erdoberfläche sogar zunimmt. Das Fehlen von SiO_2- sowie H_2SiO_3-Bestandteilen in der 220 cm-Zone darf nach der allgemeinen Analyse theoretisch nicht als zutreffend angesehen werden. Vielmehr haben wir wohl auch hier mit einem gewissen, nur eben nicht durch unsere Methoden nachweisbaren Gehalt zu rechnen, weil die gelösten Mengen sowieso auch schon im Grundwasser sehr klein sind.

Wir werden also zunächst aus diesen Beobachtungen darauf schließen müssen, daß eine Verbindung zwischen Kapillarzone und den höheren Regionen der Rekondensationszone besteht. Diese Verbindung dürfen wir durch die Feuchtigkeit selbst als gegeben hinnehmen, indem ein gewisser Ionenaustausch möglich wird, der durch die langen Zeiträume, die diesem Vorgang zur Verfügung stehen, nachweisbar wird und schließlich nicht unbedeutende Mengen befördert. Dann aber reichen die Porenwinkelkräfte auch in den Rekondensationsraum hinein, indem in den Winkeln zwischen den Teilchen wirksame Kräfte gegeben sind.

Über die Anreicherung der Konzentration in der 100 cm-Zone sei hier noch keine Erläuterung gegeben, sondern diese Erscheinung erst später in einem anderen Zusammenhange zu erklären versucht. Es mag vorläufig lediglich von einem Halt oder zumindest von einer Verlangsamung des Ionenaufstiegs gesprochen werden, für die zunächst willkürlich eine Gegenwirkung angesetzt sein mag.

Diese Gegenwirkung scheint klimatisch bedingt zu sein. Denn J. WALTHER bringt schon zum Ausdruck (Leipzig 1912, S. 125 f), daß der sogenannte Rillenstein als eine Ätzungserscheinung in der Tiefe bis zu 20 cm im Wüstenboden aufgefaßt werden muß, indem durch Wasseraufstieg und anschließende Verdunstung hier eine Konzentration der im Bodenwasser gelösten Stoffe erfolgt.

Aus diesen Gegebenheiten lassen sich zwei Möglichkeiten herleiten:

1. Der vom Kapillarsaum ausgehende Porenwinkelaufstieg ragt in den Rekondensationsraum hinein und schafft an seiner oberen Grenze die in der chemischen Untersuchung gefundene Anreicherung.

2. Niederschlagswässer und vielleicht auch schon nach unten vordringende Luftfeuchtigkeit, die aus der Atmosphäre stammt, gebietet dem Porenwinkelaufstieg im Rekondensationsraum einen Halt. Da

diese Wässer in der Wüste nur in sehr geringen Mengen vorhanden sind, ist die Anreicherungszone dort weit nach oben verlegt.

Eine Entscheidung für eine dieser beiden Möglichkeiten werden erst weitere Untersuchungen zulassen. Vermutlich greifen beide Momente ineinander.

Es mag insbesondere darauf hingewiesen werden, daß der Anreicherung der gelösten Stoffe in der 1 m-Zone auch eine Feuchtigkeitsanreicherung parallel läuft, die in der Übersicht auf Seite 29 gut zum Ausdruck kommt. Die Bedeutung dieses Feuchtigkeitsmaximums wird noch später zu klären sein.

Hydrologische Untersuchungsmethoden

Für die Durchführung unserer Versuche sind zunächst einige Methoden zu klären. Bei allen Bestimmungen des Feuchtigkeitsgehaltes im Boden spielen das Porenvolumen und die vorhandene Feuchtigkeitsmenge neben der Korngröße und Materialschichtung die ausschlaggebende Rolle. Die hieraus folgenden Untersuchungsmethoden wurden bereits bei den auf Seite 26 geschilderten Versuchen zur Klarlegung der Problemstellung angewandt.

Die wirksamen Kapillarkräfte eines Gesteines sind abhängig von dessen Korngröße. Mit zunehmender Korngröße wächst auch das Volumen der zwischen den einzelnen Teilchen befindlichen Hohlräume; damit werden die Kapillaren größer, und die kapillare Steighöhe muß abnehmen.

Bei unseren Feuchtigkeitsbestimmungen interessiert zunächst das Volumenverhältnis zwischen festem Gesteinsanteil (Gesamtvolumen) und Porenraum, also das sogenannte Porenvolumen. Das Porenvolumen wird bekanntlich in Hundertteilen bestimmt. Dazu bedienen wir uns der Formel:

$$PV = \frac{v_2}{v_1}.$$

Hierbei bezeichnet v_2 das Volumen des von einem trockenen Gestein bis zur Sättigung aufgenommenen Wassers (Porenraum), v_1 das Volumen der Gesteinsmasse selbst.

Es gibt bestimmte Gesteine, wie etwa Löß, die eine gewisse Wasseraufnahmefähigkeit besitzen. Um hier das Porenvolumen zu ermitteln, müssen andere Versuchswege beschritten werden. Nähere Angaben hierzu finden wir bei KEILHACK (Berlin 1935, Seite 91 f).

Zur Bestimmung des Porenvolumens sei ein Musterbeispiel nach der allgemeinen Formel angeführt[23]). Ein Meßglas mit 500 ccm Inhalt werde mit trockenem Sande gefüllt, dessen Porenvolumen zu ermitteln ist. Hierzu wird so lange Wasser gegossen, bis der Wasserspiegel genau mit der Oberfläche des Sandes abschneidet. Indem hierzu eine Menge von 200 ccm Wasser angenommen sei, ergibt sich nach der auf Seite 24 genannten Formel für das Porenvolumen

$$PV = \frac{200}{500} = \frac{2}{5} = 40\%$$

[23]) Vgl. K. KEILHACK, Berlin 1935, S. 91.

Das Porenvolumen beträgt also im Verhältnis zum Gesamtvolumen 40%.

Für die Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit werden wir das Porenvolumen zugrunde legen, um den Maximalwert zu kennen. Greifen wir auf das soeben ausgeführte Beispiel zurück, so fanden wir hier ein Porenvolumen von 40%. Es werden also z. B. in einer Menge von 10 ccm Boden bei völliger Sättigung, d. h. im Kapillarbereich, 4 ccm Wasser zu erwarten sein.

Unsere noch darzustellenden Feuchtigkeitsbestimmungen erfassen selbstverständlich im besonderen auch den Bereich der Rekondensationszone. Hier wird uns interessieren, mit wieviel Hundertteilen Wasser der Boden im Verhältnis zum Porenvolumen versehen ist. Zur Bestimmung könnten wir eine Probe von z. B. 10 ccm Boden entnehmen, die enthaltene Feuchtigkeitsmenge durch Wägung, Verdampfung und nochmalige Wägung bestimmen, um dann den Gehalt an Wasser zum bekannten Porenvolumen in Hundertteilen auszudrücken. Diese an sich einfach erscheinende Methode wird jedoch nicht zu empfehlen sein, da sie entweder zu ungenau oder zu zeitraubend arbeitet. Deshalb sei besser für unsere Spezialuntersuchungen eine allgemein gültige Formel entwickelt, die als Ergebnis den Anteil der Bodenfeuchtigkeit zum Porenvolumen bringt. Wir bezeichnen das Naßgewicht des Bodens (so also, wie wir ihn als Probe entnehmen) mit NG, das Trockengewicht desselben Bodens nach Verdampfung der in ihm befindlichen Feuchtigkeit mit TG, seine Gesteinsdichte[24]) mit S, sein Porenvolumen, das nach der genannten Methode bestimmt wurde, mit PV und erhalten zur Ermittlung seines Feuchtigkeitsgehaltes in Hundertteilen, gesetzt zum gesamten Porenvolumen, die Formel:

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt} = \frac{(NG - TG) \cdot 100}{\frac{TG \cdot VP}{S \cdot 100}} .$$

Der Ausdruck $\frac{TG \cdot PV}{S \cdot 100}$ liefert das wirkliche Porenvolumen der zu untersuchenden Menge. Wir nehmen das Trockengewicht TG, das wir durch die Gesteinsdichte dividieren, um zum Gesamtvolumen (Bodenbestandteile + Porenvolumen) zu gelangen, aus dem wir durch entsprechende Umrechnung, unter Bezugnahme auf das bekannte Porenvolumen in Hundertteilen, das reale Porenvolumen der betreffenden Bodenmenge in ccm erhalten.

Den Feuchtigkeitsanteil in Hundertteilen, der sich vor der Trocknung

[24]) Das hier zu verwendende „spezifische Gewicht" deckt sich nicht mit dem üblichen physikalischen Maß. Es muß neu im besondern für die hier zu bringenden Versuche ermittelt werden und wird benutzt, um rechnerische Vereinfachungen zu liefern. Bei der Bestimmung geht man nicht vom Volumen des Gesteins an sich aus, sondern bezieht das Gesamtvolumen einschließlich der Poren ein. Es wird also z. B. ein Meßglas von 100 ccm mit trockenem Sand gefüllt, sein Inhalt gewogen und durch das Volumen dividiert, um das besondere „spezifische Gewicht" zu liefern, für das der Begriff „Gesteinsdichte" herangezogen sei. Der Wert für die Gesteinsdichte ist stets kleiner als der für das spezifische Gewicht im physikalischen Sinne.

im Boden befand, ermitteln wir, indem wir den Feuchtigkeitsgehalt in g (NG — TG) einbeziehen und auf Hundertteile ausdrücken[25]).

Die nach dieser Methode gefundenen Werte vermitteln am ehesten ein klares Bild. Indem wir über eine Aufstellung zu den allgemeinen Angaben das Porenvolumen des zu untersuchenden Gesteins setzen, können wir nach den so ermittelten Werten anschaulich ermessen, ein wie großer Teil des Bodens bzw. seines Porenvolumens mit Wasser durchtränkt ist. Finden wir ein Ergebnis von 100%, so bedeutet dieses, daß Kapillarität vorliegt, 50% bezeichnen eine Ausfüllung der Bodenporen zur Hälfte usf.

Werden derartige Untersuchungen bei Bohrungen vorgenommen, so wird man aus der Folge des Feuchtigkeitsgehaltes und der Art des Gesteins gewisse Schlüsse auf die Tiefe eines vielleicht zu erwartenden Grundwasserspiegels machen können. Insbesondere werden solche Schlüsse von Bedeutung, sobald wir eine Feuchtigkeit von 100% ermitteln, also in den Kapillarsaum vordringen.

Ganz allgemein wird es für Untersuchungen der verschiedensten Art wichtig sein, gewisse Anhaltspunkte zu haben, aus denen das Porenvolumen eines Gesteins hervorgeht. Es lassen sich daraus Schlüsse auf die wirksame Kapillarität machen. Unsere Übersicht, die das Porenvolumen in Hundertteilen zum Gesamtvolumen setzt, übernehmen wir von P. WINTGENS (Freiburg 1911, Seite 68):

Grenzwerte für Sand	40—28%
Sehr grober Sand mit Kies	38%
Mittelkies (Durchmesser 7 mm) . . .	37%
Feinkies (Durchmesser 4 mm)	36%
Grobsand (Durchmesser 2 mm) . . .	36%
Mittelsand (Durchmesser 1 mm) . . .	40%
Feinsand (Durchmesser ⅓ mm) . . .	42%
Feiner grauer Lehm	34%
Grober dunkelfarbiger Lehm	31%
Brauner Ton	44%
Schwarze Gartenerde	28%
Humusarmer, toniger Boden	48%
Humusarmer, sandiger Lehmboden . .	50%[26])

In unserer Untersuchungsmethode zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes muß die im Boden befindliche Wassermenge in Gramm ermittelt werden. Von der Genauigkeit dieser Bestimmungen hängt das gesamte Versuchsergebnis ab, und es ist deshalb von Bedeutung, diese

[25]) $NG - TG$ = Wassergehalt in g, S = Gesteinsdichte, $\frac{H_2O\text{-Gehalt} \cdot 100}{(PV)}$ = Feuchtigkeitsgehalt bezogen auf PV.

PV = Porenvolumen in %
(PV) = Porenvolumen in ccm
$\frac{TG}{S}$ = Gesteinsvolumen; $\frac{TG}{S} \cdot \frac{VP}{100} = (PV)$

[26]) In den Daten von P. WINTGENS kommen Unstimmigkeiten zum Ausdruck, die u. U. an einer mangelnden Charakterisierung des untersuchten Materials liegen könnten. Auf jeden Fall sei die Aufgabe exakter Untersuchungen zum Ausdruck gebracht an einem genauer festgelegten Material.

zunächst ohne jede Schwierigkeit erscheinende Frage näher zu behandeln.

Die Durchführung der hiermit verbundenen Untersuchungen erfolgt derart, daß man in einem Glasgefäß von bekanntem Gewicht den feuchten Boden wägt, dann eine vollständige Trocknung vornimmt, das Gewicht dieses getrockneten Bodens bestimmt und durch Subtraktion die Feuchtigkeitsmenge festlegt. Die Trocknung des Bodens wird am besten im elektrischen Ofen bei konstanter und regulierbarer Temperatur vorgenommen.

Als Trockentemperatur wird vielfach ein Wert von 110° C angegeben. Die Siedetemperatur des Wassers ist damit überschritten, um eine Überwindung der im Boden wirksamen und das Wasser festhaltenden Kapillarkräfte zu erzielen. Eine Nachprüfung über die Richtigkeit dieser Temperatur zeigte jedoch, daß sie für noch nicht vorgetrocknetes, d. h. aus der natürlichen Umgebung entnommenes Material falsche Werte liefert. Denn der Boden enthält vielfach organische Stoffe, die bei längerem Andauern dieser Temperaturen Sauerstoff aus der Luft aufnehmen und unter Umständen eine nicht unwesentliche Erhöhung des Trockengewichtes herbeiführen.

Deshalb mag auch in geologisch-hydrologischen Arbeiten für genaue Wasserbestimmungen inhomogener, oxydationsfähiger Substanzen, insbesondere humus- oder kolloidhaltigen Böden die in der Landwirtschaft ganz allgemein angewandte Vortrocknung oder kombinierte Trocknung gebräuchlich werden. Einigermaßen genaue H_2O-Gehaltsangaben setzen dieses bei chemischen Arbeiten übliche Verfahren voraus. Ein in den Rahmen der Untersuchungen zu dieser Arbeit fallendes Beispiel mag das zeigen.

Es wurde Gartenerde aus 5—10 cm Tiefe gewählt, die sich durch großen Humusreichtum auszeichnete. Es ergab sich nach Abwägung von 20 g aus einer Vorratsmenge und Trocknung bei 110° C während einer Dauer von 80 Minuten ein Trockengewicht von 13,64 g. Die gleiche Menge wurde dann während derselben Zeit bei 80° C getrocknet und lieferte ein Trockengewicht von 14,12 g, das also höher als das der ersten Probe lag. Daraus ist ersichtlich, daß während der Trocknung noch nicht die gesamte Wassermenge entfernt wurde. Bei einem dritten Versuch erfolgte die Trocknung so, daß während einer Zeit von 60 Minuten bei 80° C vorgetrocknet und schließlich für 20 Minuten bei 110° C nachgetrocknet wurde. Dabei ergab sich als Trockengewicht 13,48 g. Es liegt durch diesen Vergleich gar kein Zweifel vor, daß die übliche Trockentemperatur eine gewisse Sauerstoffbindung mit sich bringt. Man wird nun mit Recht fragen, ob nicht schließlich eine kürzere Trocknungszeit bei 110° C dasselbe Ergebnis bringt wie die zuletzt angeführte kombinierte Trocknung. Auch hierzu wurden Versuche durchgeführt, wobei es sich zeigte, daß der erforderliche Minimalwert niemals erreicht wurde. Die Aufstellung gibt Einzelheiten am besten wieder:

Trocknung bei 110° C während 80 Minuten TG = 13,64 g
70 Minuten TG = 13,89 g
60 Minuten TG = 14,12 g
50 Minuten TG = 14,61 g

Aus dieser Übersicht wird ohne weiteres deutlich, daß sich bei den längeren Trockenzeiten letzter Wasserentzug und Sauerstoffaufnahme die Waage halten und nur kleine Differenzen ergeben. Man wird also nicht sagen dürfen, daß es die Differenzen zwischen den einzelnen Beträgen ausschließlich auf den Feuchtigkeitsentzug beziehen. Es kommen Faktoren hinzu, die eine Verkleinerung der Unterschiede durch Gewichtszunahme bewirken, und wenn wir angeben, daß eine Trocknung von 90 Minuten Dauer ein Gewicht von 13,76 g brachte, so ist zu sehen, daß die Trocknungszeit von 80 Minuten bereits die maximale Verdunstung liefert und jetzt die Oxydation bei an organischen Stoffen reichen Böden eine Gewichtszunahme bedingt.

Die ermittelten Werte und damit verbundenen Schlüsse sind an eine ganz bestimmte Bodenart und Versuchseinrichtung gebunden, dürfen also nicht verallgemeinert werden.

Die kombinierte Trockenmethode wird nicht für solche Untersuchungen erforderlich sein, wo der als Versuchsobjekt dienende Boden bereits vorher getrocknet wurde. Hier erhalten wir gute Ergebnisse, indem allein bei 110° C und auch mehr getrocknet wird.

Es hat die Frage eine Berechtigung, ob bei dieser Trocknung die gesamte Feuchtigkeit vollständig entfernt wird. Eine restlose Trocknung im mathematischen Sinne kann nicht stattfinden und ist auch nicht beabsichtigt, da wir ja durchweg auf der Oberfläche aller Gegenstände eine gewisse Wasserhaut antreffen, die in der Hydrologie vielfach als „Filmwasser" bezeichnet wird. Da diese Feuchtigkeit an sich für die Vegetation belanglos ist, weil ihr mengenmäßiger Betrag außerordentlich klein und ihre Bindung an das Bodenteilchen groß ist, werden wir auf ihre Beseitigung nicht unbedingt Wert zu legen haben.

Die Versuchseinrichtung zur Beobachtung der Bodenwasser-Bewegung

Unsere Ausführungen legten bereits dar, daß die bisher durchgeführten Versuchsmethoden noch kein klares Ergebnis zu vermitteln vermochten, weil sie in ihrer Anlage als nicht genügend angesehen werden müssen. Insbesondere sind für neue Versuche eine Ausdehnung über lange Zeiträume, ein möglichst großes Volumen des Versuchsraumes und eine Angleichung an die natürlichen Bedingungen hinsichtlich der Lage des Versuchsraumes anzustreben. Unter diesen Richtlinien gelangte folgende Versuchsmethode zur Ausarbeitung:

Es wurde ein Holzbehälter in den Maßen 35×35×200 cm angefertigt, der — wie aus den Daten hervorgeht — die Form einer Säule besitzt. Seine beiden Enden blieben offen.

Der Behälter wurde am unteren Ende mit einer Drahtgaze versehen und dann mit trockenem Sand einer bestimmten Korngröße gefüllt. Das Ende des Behälters tauchte in Wasser ein, das in seiner Bedeutung dem Grundwasser zu entsprechen hatte und auf stets konstantem Niveau zu halten war. In verschiedenen Höhen des Behälters befanden sich Einrichtungen zur Entnahme von Proben, die auf ihren Feuchtigkeitsgehalt geprüft und darnach wieder an die gleiche Stelle in den

Behälter eingefügt wurden. Das obere Ende des Behälters blieb offen, damit die natürlichen Bedingungen voll zur Einwirkung gelangen konnten. Bei Regen wurde eine Glasscheibe aufgelegt, um diesen Faktor auszuschließen zum Zwecke einer Isolierung der im Tages- und Jahresrhythmus erfolgenden Erscheinungen.

Diese zunächst kurz gebrachte Beschreibung der Versuchseinrichtung mag nur eingangs einen allgemeinen und zusammenhängenden Eindruck vermitteln. Die Ausgestaltung des Gerätes verlangte spezielle Einrichtungen, um eine genaue Arbeit zu gewährleisten.

Der Behälter hatte die Aufgabe, dem in ihm befindlichen Gestein einen völligen Abschluß gegenüber seiner Umgebung zu liefern, so weit das die Bodenfeuchtigkeit betrifft. Es sollte also ein in sich abgeschlossener vertikaler Bodenraum geschaffen werden. Die damit notwendige Abdichtung erfolgte durch Paraffin, mit dem nicht allein die Poren, sondern überhaupt die gesamten Innenflächen verstrichen wurden.

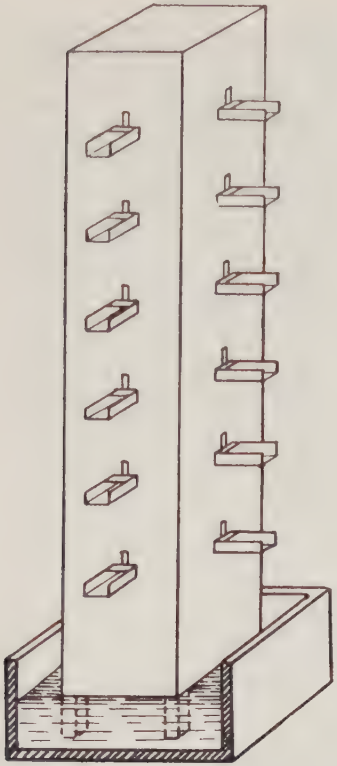
Eines besonderen Ausbaues bedurften die Stellen zur Entnahme von Proben für die Prüfung ihres Feuchtigkeitsgehaltes. Die Anbringung von einfachen Klappen wäre völlig unzureichend gewesen. Denn das eingefüllte Material hat keine feste Lage und müßte beim Öffnen der Klappen aus dem Behälter herausgleiten. Außerdem wäre eine ständige Verbindung mit der Umgebung durch die vorhandenen Spalte bedingt und eine Einfüllung der entnommenen Proben an der zutreffenden Stelle unmöglich. Weiter hätte eine genaue Orientierung bezüglich der Lage in cm über dem Grundwasser Schwierigkeiten machen müssen. Deshalb erfolgte der Einbau besonderer Entnahmestellen, die nach folgenden Gesichtspunkten ausgestaltet wurden:

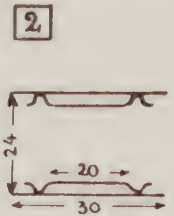
1. Die Entnahmestelle mußte einen möglichst vollständigen Abschluß nach außen geben oder zumindest stets auf einfache Weise eine Abdichtung mit Paraffin oder Leukoplast gestatten.

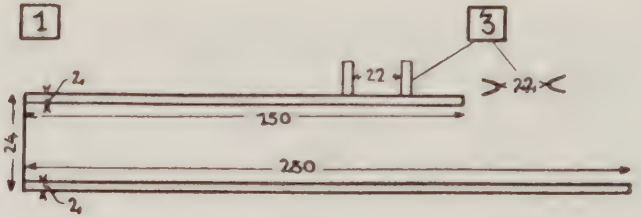
2. Die Entnahmestelle mußte eine Einfügung des geprüften Bodens dort zulassen, wo er dem Behälter entnommen wurde, damit die einzelnen Bodenteilchen in ihrer Lagerung so gut wie nicht gestört werden. Denn nur so ist es ja möglich, genau die einzelnen Höhenlagen hinsichtlich ihres Feuchtigkeitsgehaltes festzulegen und zuverlässige Werte zu erhalten.

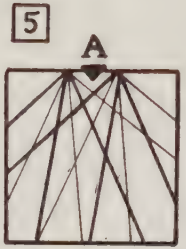
3. Die Entnahmestelle mußte in horizontaler Richtung schwenkbar sein. Dadurch war zu erreichen, daß bei jeder zu entnehmenden Probe immer neues Material zur Beobachtung gelangte, das den Bedingungen eines Gesamtbereichs unterlag. Das geprüfte und wieder eingefüllte Material mußte anderseits genügend Zeit zur Erlangung eines seiner Lagerung entsprechenden Feuchtigkeitsgehaltes besitzen, nachdem es durch die Untersuchung gestört worden war. Um eine möglichst lange Erholungszeit zu erreichen, wurden auf einem Niveau an zwei Seiten des Behälters je eine Entnahmestelle eingerichtet.

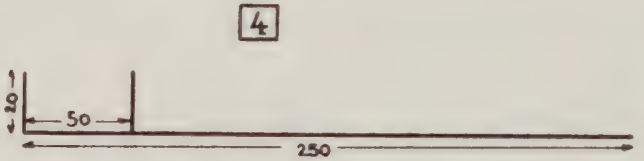
Zum Einbau der Entnahmestellen wurden an den betreffenden, später noch in ihrer Lage näher zu bezeichnenden Punkten in die Mitte der Seitenwand rechteckige Öffnungen angebracht, die eine Höhe von 20 mm und eine Breite von 50 mm vermehrt um die doppelte Materialstärke der Entnahme-Einrichtung besaßen. Die entsprechenden Entnehmer bestanden in unserem Falle aus Zinkblech. Die Höhe erfährt

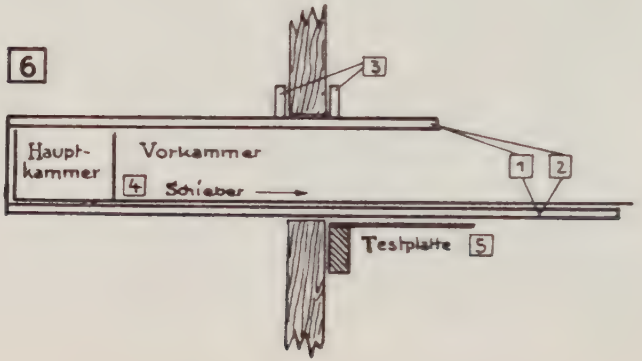



2
24
20
30


1
3
2
22
22,4
24
150
280
2


5
A


4
20
50
250


6
3
Haupt-
kammer
Vorkammer
4
Schieber
1
2
Testplatte
5

eine weitere Vergrößerung, die durch einzubauende Führungsschienen bedingt wird. Darauf ist noch zurückzukommen.

In die so angebrachte Öffnung wird die Entnahmevorrichtung eingesetzt, die im wesentlichen aus dem Rahmen mit seitlichen Führungsschienen, zwei Seitenwänden, die in diesen Schienen verschiebbar sind, und einem Schieber zur Entnahme der Proben besteht.

Der Aufbau der einzelnen Teile ist aus den Skizzen ersichtlich. Abbildung 1 zeigt den Rahmen von der Seite gesehen, Abbildung 2 einen Querschnitt parallel zur Vorderseite. Der Rahmen besteht aus einer oberen und einer unteren Wand, von denen die obere 150 mm, die untere 250 mm lang ist. Die Wände sind doppelt, damit trotz anzubringender Führungsschienen durchgehend horizontale Flächen entstehen, wie es Abbildung 2 veranschaulicht.

Die inneren Bleche dieser Doppelwände tragen gleichzeitig die Führungsschienen, indem sie an ihren Rändern entsprechend gebogen wurden (Abb. 2). Da Innen- und Außenblech gleiche Breite besitzen, muß die Außenwand beim fertigen Stück überstehen, da ja für die Innenbleche durch Anbringung der Schienen eine Verkürzung gegeben ist. Dieses Überstehen ist wichtig, um bei der horizontalen Bewegung unserer Einrichtung eine scharfe Trennung des Bodens zu ermöglichen.

Die Maße für die einzelnen Teile sind aus den Skizzen ersichtlich. Die Gesamtbreite der Wände beträgt 30 mm, die Tiefe der Führungsschienen knapp 2 mm und die wirksame, zwischen den Führungsschienen liegende Breite 20 mm.

Die somit hergestellte Ober- und Unterwand sind an der Stirnseite an ein 25×30 mm großes Zinkblech zu löten, das die Kopfwand darstellt und wobei 25 mm als Höhe gelten. Auf diese Weise ergibt sich für den wirksamen Innenraum des Gehäuses eine Höhe von 20 mm, die dadurch erzielt wird, daß wir von der Höhe der Stirnwand die Tiefe der Führungsschienen sowie einen Millimeter für die Stärke des noch zu beschreibenden Schiebers abrechnen. Damit werden wir auch zugleich unsere Angaben über die Höhe der rechteckigen Öffnung in den Seitenwänden des Versuchsgehäuses dahin ergänzen können, daß wir hier für den beschriebenen Fall 26 mm einsetzen.

Auf die Oberwand des Gehäuses werden wir zwei 10 mm hohe Führungsleisten in U-Form (Querschnitt vgl. Abb. 3) auflöten, von denen die erste etwa 130 mm vom Kopf des Gehäuses entfernt liegt.

Der Zwischenraum bis zur zweiten Leiste ergibt sich durch die Wandstärke des Versuchsbehälters. Beträgt diese 20 mm, so werden wir etwa 22 mm für die Leisten wählen, um einen gewissen Spielraum zu haben. Durch diesen Zusatz wird der ganzen Einrichtung der erforderliche Halt gegeben, indem sie wie mit einer Gabel an der Seitenwand des Gehäuses eingeklemmt wird. Die U-Form der Leisten gestattet dabei ein bequemes Bewegen der Einrichtung in der Horizontalen.

Die Größe der Seitenwände ergibt sich mit 23×250 mm. Sie haben die Aufgabe, einerseits dem Behälter einen gewissen Abschluß zu geben, anderseits bei horizontaler Bewegung der Entnahmeeinrichtung durch Entfernung ein freies Gleiten durch das Gestein zu ermöglichen.

Der Schieber, den Abbildung 4 darstellt, dient der Entnahme von Bodenproben, gleichzeitig aber auch wieder dem Einführen der untersuchten Probe an ihren ursprünglichen Platz. Er besteht aus einem

20×270 mm großen Blech, dessen vorderes Ende im rechten Winkel in einer Länge von 20 mm umgebogen ist. In einem Abstande von 50 mm von hier ist ein weiteres Blech 20×20 mm aufgesetzt, so daß in gewisser Weise eine kleine Kammer entsteht. Seitenwände wurden nicht angefügt.

Die Kammer hat die Aufgabe, eine Isolierung der mehr aus dem Innern des Behälters stammenden Bodenteile zu ermöglichen, da gerade diese für die Untersuchung besonders wichtig sein werden, weil sie durch die Wände des Behälters am wenigsten beeinflußt sind. Man wird also beim Herausziehen des Schiebers zur Entnahme der Probe den außerhalb der Kammer liegenden Boden nicht untersuchen, sondern in ihm die natürliche Feuchtigkeit belassen, ihn nach der Untersuchung der Probe in die Kammer des Schiebers und den untersuchten Boden in die Vorkammer bringen, um so durch einen Austausch zu bewirken, daß die für die Untersuchung in Frage kommenden Gesteinsteile in relativ kurzer Zeit die den natürlichen bzw. versuchsgemäßen Verhältnissen entsprechende Feuchtigkeit aufnehmen. Das kann als ein kleiner praktischer Hinweis gelten, der für die Genauigkeit der Ergebnisse nicht unbedeutend sein dürfte.

Nach Fertigstellung der einzelnen Teile wird zunächst der Rahmen für sich entsprechend angebracht. Die Oberwand wird etwas heruntergedrückt und der Rahmen so weit eingeführt, bis die Wand des Holzbehälters gerade zwischen die beiden Führungsleisten zu liegen kommt. Dann werden Schieber und später auch die Seitenwände angebracht.

Der Beschreibung dieses Gerätes mußte ein so weiter Raum zur Verfügung gestellt werden, weil von seiner Ausgestaltung das Gelingen der Versuche überhaupt abhängt. Auf welche Momente es dabei im einzelnen ankommt, wurde bereits an anderer Stelle[27]) ausgeführt.

Über die Arbeitsweise der Einrichtung wären noch nähere Anweisungen zu geben:

Indem wir den Behälter durchgehend mit gleichartigem Gesteinsmaterial beschicken, werden Feuchtigkeitsunterschiede lediglich in verschiedenen Höhenlagen vorliegen. Durch horizontale Bewegung der Entnahmeeinrichtung ergibt sich demnach die Möglichkeit, immer laufend frisches Gestein aus einem Niveau zu entnehmen. Zur leichteren Handhabe werden wir aus Karton eine Testvorlage nach Abb. 5 fertigen. Sie wird so angelegt, daß sich der Punkt A unter der unteren Wand der aus dem Behälter herausschenden Einrichtung befindet, wobei die radial von A ausgehenden Doppellinien die jeweilige Lage des herausschenden Teiles der Entnahmeeinrichtung bezeichnen.

Diese radial angebrachten Doppelstriche geben eine Gewähr dafür, daß der Entnehmer von Probe zu Probe immer so weit gedreht werden kann, daß auch wirklich stets restlos neues und noch nicht gestörtes Material zur Untersuchung gelangt.

Die Arbeit mit der Einrichtung erfolgt in dieser Weise:

Der Schieber wird herausgezogen, wobei die Seitenwände eingeschoben sind. Das Material außerhalb der Kammer des Schiebers wird aufgefangen und gesondert aufbewahrt; das Gestein, das sich in der Kammer befindet, gelangt zur Untersuchung. Danach wird das nicht-

[27]) Vgl. S. 24.

bearbeitete Gestein in die Kammer des Schiebers und das untersuchte Material in die Vorkammer gebracht, der Schieber eingeführt. Bei der folgenden Untersuchung sind zunächst die Seitenwände zu entfernen, ist die Einrichtung gemäß der Testplatte zu drehen, so daß frisches Material in Kammer und Vorkammer gelangt. Darauf werden die Seitenwände wieder eingefügt und die Untersuchung erfolgt wie beschrieben.

Ein Gesamtbild der Einrichtung vermittelt nochmals Abb. 6, die als Längsschnitt ausgeführt ist.

Um möglichst eindeutige Versuchsergebnisse zu erzielen, müssen die Untersuchungen zeitweise in sehr kurzen Abständen durchgeführt werden. Da der zu untersuchende Boden stets gestört wird, ist nach einer Reserve zu suchen. Zu diesem Zweck wird die Entnahmeeinrichtung für besonders beanspruchte Stellen an zwei Seiten des Behälters eingebaut. Hierzu sind zwei benachbarte Wände zu wählen, eine Begründung hierüber folgt später.

Eine Abdichtung der durch die Anbringung der Entnahmeeinrichtung bedingten Öffnungen und Poren erfolgt am besten mit Leukoplaststreifen, da die Abdichtung ständig neu und in möglichst kurzer Zeit vorgenommen werden muß, weil unser Entnehmer ja stets bewegt und in seiner Lage verändert wird.

Für die Füllung des Behälters wählen wir gut vorgetrocknetes Material, das von organischen Stoffen frei ist. Dann ergeben sich für die Prüfungen beim Trocknungsprozeß Erleichterungen, wie schon früher ausgeführt wurde. Starke Vorerhitzung nimmt dem Material zwar vollkommen seinen Charakter als „Boden" — ganz besonders gilt das vom Löß. Aber es ergaben sich daraus zunächst versuchstechnische Vereinfachungen, die für spätere Arbeiten nach Gewinnung erster Erfahrungen in Fortfall kommen mögen.

Anderes Material wie z. B. Löß, das noch nicht vorgetrocknet ist, muß vor dem Einfüllen einer sorgfältigen Trocknung unterzogen werden. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, zuerst größere Mengen über offenem Feuer vorzutrocknen, um dann kleinere Mengen über einer Gasflamme besonders nachzubehandeln. Diese Trocknungsprozesse nehmen wegen der erforderlichen großen Mengen viel Zeit in Anspruch. Deshalb werden gleichzeitig immer mehrere Versuche laufen bzw. vorbereitet werden, damit günstige Ausnutzung der Zeit möglich ist.

Der Versuch darf noch nicht unmittelbar nach Einfüllung des Materials vorgenommen werden. Man wird also zunächst noch kein „Grundwasser" in den Behälter geben, in dem das gesamte Gerät steht. Auch nach oben ist für einen guten Abschluß zu sorgen.

Das eingefüllte Material ist nämlich anfangs noch relativ locker und muß erst mit der Zeit nachsacken. Man wird also den Behälter immer wieder auffüllen und bis zum Beginn des Versuches etwa 14 Tage vergehen lassen.

Unsere Versuche wurden vorerst mit Sand durchgeführt, der wegen eines relativ großen Porenvolumens eine feine Gliederung liefert und auch nicht allzu große Behälter erfordert. Eine Länge von 2 m ist für Sand gerade richtig, während für Löß eine Mindestlänge von 3 m empfehlenswert wird. Außerdem sind die Versuche mit Sand relativ schnell durchführbar, wenn sie sich zwar im ganzen auch etwa über ein Jahr

erstrecken. Durch die energische Trocknung sind Vereinfachungen gegeben, weil eine Wasseraufnahmefähigkeit durch das Material selbst fortfällt. Wenn wir es mit Boden und nicht mit mehrfach stark erhitzten Gesteinstrümmern zu tun haben, wird immer eine H_2O-Aufnahmefähigkeit durch das Material selbst vorliegen. Das ist für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf natürliche Verhältnisse von grundsätzlicher Bedeutung.

Für die Untersuchungen mit Sand wird oben die Auflage einer dünnen, etwa 10 cm starken Humusschicht wichtig, die wegen ihrer größeren Kapillarität und Affinität zu Wasser für die aus der Atmosphäre stammende Feuchtigkeit gewissermaßen bremsend wirkt und damit eine gute Ausgestaltung der Kapillar- sowie Rekondensationszone über dem Grundwasserspiegel gestattet. Fehlt diese hier schützende Schicht, so wird der Versuchsbehälter wesentlich länger als 2 m sein müssen, damit eine hinreichende Trennung zwischen aufsteigender und absinkender Feuchtigkeit eintritt.

Über die Anbringung der Entnahmeeinrichtungen wurde im Hinblick auf ihre Verteilung noch nichts angeführt. Allgemein gültige Angaben lassen sich kaum machen. Denn es ist ja zu berücksichtigen, daß sich die Bedingungen mit jeder Gesteinsart schon wegen des verschiedenen Porenvolumens ändern. Deshalb wird es zweckmäßig, wenn auf die Versuchsergebnisse verwiesen wird, aus denen die Lage der Entnahmestellen ohne weiteres hervorgeht.

Die Aufstellung des Behälters bedarf einiger Überlegungen. Es ist zunächst zu beantworten, ob er in der Sonne oder im Schatten stehen soll. Zweckmäßig ist es, wenn wir im Bereich des Tagesrhythmus möglichst große Temperaturschwankungen erzielen. Anderseits werden die Versuchsergebnisse auch gerade für solche Bezirke wesentlich sein, wo kein Schatten durch Bäume usw. vorliegt. Denn die Untersuchungen finden ihren besonderen Wert gerade bei Berücksichtigung solcher Pflanzen, die mit ihren Wurzeln keine größeren Tiefen, insbesondere nicht den Kapillarsaum erreichen.

Weiter wird man fragen müssen, ob der Behälter frei a u f dem Erdboden oder gebunden i n der Erde zu stehen hat. Hierbei wäre er dann lediglich von zwei Seiten aus frei zu halten, damit die Proben entnommen werden können.

Hierzu ist im voraus zu sagen, daß eine freie Aufstellung wohl Beschleunigung der zu beobachtenden Vorgänge bewirken wird, da eine intensivere Reaktion auf Temperaturunterschiede vorliegt. Es bleibt nur offen, ob nicht damit eine gewisse Verwischung der einzelnen Zonen verbunden ist und wie weit die sich damit ergebenden Werte den natürlichen Bedingungen angleichen.

Über diese Dinge wird am besten ein Vergleichsversuch Aufschluß bringen. Es ist ein Behälter frei aufzustellen und ein zweiter so tief in die Erde zu bringen, daß sein oberes Niveau mit der Erdoberfläche übereinstimmt. Beide Versuchsgeräte müssen mit gleichem Sand gefüllt und zu gleicher Zeit in Betrieb gesetzt werden. Laufende gleichzeitige Untersuchungen aus derselben Höhenlage müßten dann Vergleichsmomente schaffen und praktischen Aufschluß geben.

Der Einbau des Behälters in die Erde hat so zu erfolgen, daß er möglichst weit unmittelbar an den Erdboden angrenzt. Nur die Ent-

nahmestellen werden frei bleiben. Davor ist ein Raum anzubringen, der zum Einsteigen und zur Entnahme ausreicht.

Ein möglichst zweckmäßiger Einbau des Behälters in den Erdboden ist auch der Grund, weshalb die Entnahmestellen auf zwei benachbarten Seiten früher als günstig empfohlen wurden.

Die Beantwortung der Frage, ob freie Aufstellung oder Einbau in den Erdboden richtig ist, kann durch wenige Daten bereits erfolgen. Deshalb werden wir für diese Voruntersuchungen nicht die gesamten Werte angeben, sondern uns nur auf ein Zahlenbeispiel beziehen. Es stammt von Untersuchungen nach einer Laufzeit von 8 Wochen für beide Versuche und gibt den Feuchtigkeitsgehalt in verschiedenen Höhen (von unten gemessen) bezogen auf das Porenvolumen des zu prüfenden Gesteins, eines mittleren Sandes[28]):

Beobachtungshöhe in cm	Feuchtigkeitsgehalt in %	
	Freistehender Behälter	Gebundener Behälter
175	13,11	14,73
150	13,09	12,82
130	8,95	7,33
120	11,16	11,49
100	11,10	13,76
80	18,06	18,27
50	6,93	6,41
35	14,49	13,66
32	80,08	88,72

Es ist wichtig zu beachten, daß die Angaben über die Beobachtungshöhe Durchschnittswerte bezeichnen, die sich auf einen Zonenstreifen beziehen, der sich bis zu einem cm oberhalb und einem cm unterhalb der jeweils genannten Werte erstreckt.

Aus den Zahlen ist zu ersehen, daß der im Erdboden befindliche Behälter etwas größere Unterschiede aufweist. Weiter ist erkennbar, daß sich zeitliche Differenzen nicht ergeben haben. Schließlich sind schon hier gewisse Unterschiede in Form von Unregelmäßigkeiten im Bereich der Rekondensation gegenüber unseren Erwartungen feststellbar. Die Ursache und Bedeutung dieser hier auftretenden Feuchtigkeitsschwankungen werden uns später noch näher zu beschäftigen haben. Wie weit der im Erdboden befindliche Behälter eine völlige Angleichung seiner Temperatur an den gewachsenen Boden, d. h. an seine Umgebung erfährt, mag zunächst noch dahingestellt bleiben. Denn es ist zu berücksichtigen, daß ein vollständiger Einbau in den Boden aus versuchstechnischen Gründen nicht durchführbar ist.

Beobachtungen über die Feuchtigkeitsstruktur bei Sandfüllung

Unseren Untersuchungen wird der im Erdboden gebundene Behälter

[28]) Der gleiche Sand wurde für die noch auszuführenden Untersuchungen verwendet, so daß genauere Daten erst später angegeben sind.

zugrunde zu legen sein, so daß hier allein die damit erzielten Daten berücksichtigt werden sollen. Man kann höchstens bis zu einem bestimmten Grade die Ergebnisse des freistehenden Behälters zur Kontrolle einbeziehen, indem sie sich anfangs wenigstens der Größenordnung nach ganz gut decken.

Für die Untersuchungen diente ein zwei Meter hoher Behälter mit den bereits beschriebenen Einrichtungen. Er wurde mit Sand gefüllt, der ein Porenvolumen von 37,6% besitzt bei einem mittleren Korndurchmesser von ca. 1 mm. Bedeutende Abweichungen in der Korngröße waren nicht feststellbar, so daß ein für die Untersuchungen ideales Material vorlag. Seine Gesteinsdichte wurde mit 1,647 ermittelt.

Über dem Sand befand sich für den oberen Anschluß eine 10 cm starke Humusschicht mit einem Porenvolumen von 27,7% und einer Gesteinsdichte von 0.921. Die im Bereich der Humusdecke erzielten Werte werden ausschließlich quantitativ von Wichtigkeit sein, um daraus zu ersehen, wie weit die in ihrer Lagerung den natürlichen Verhältnissen entsprechende Humusdecke als Feuchtigkeitsreservoir zu dienen hat, ihr vielleicht zeitweise ein kapillarer Transport in die Tiefe zukommt und sich daran ein Rekondensationsbereich angliedert.

Unsere folgenden Tabellen geben einen Überblick nach Messungen eines weiten Zeitraumes. Es ist dabei wichtig zu wissen, daß ein oberer Abschluß des Behälters nur während Regenzeiten und diesiger Tage erfolgte. Wenn zwar auch in der Natur eine ständige Minderung durch den seitens der Vegetation erfolgenden Verbrauch stattfindet, so müssen wir hier berücksichtigen, daß wir einen Zustand völliger Trockenheit zum Ausgang nehmen und erst nach und nach solche Verhältnisse erzielen, wie sie im Bereich des freien Bodens von jeher vorliegen.

Die ersten Beobachtungsergebnisse (Messungen stets zu gleicher Tageszeit gegen 14 Uhr, begonnen im September 1935) ergaben:

Höhe in cm[20]) am:	13/9	14 9	15 9	17. 9	18/9	20. 9	21. 9	22. 9	23. 9
175	Beginn		0,9	4,8	6,7	8,3	10,0	11.8	12,2
120	des							4,3	4,8
100	Ver-							1,4	2,1
80	suches							?	17,9
50									0,0
35									13,6
25						16,8	18,6	21,7	28,3
15			2,3				51,0	76,9	100
10			100	100	100	100	100	100	100

Schon bei den ersten Untersuchungen sind einige Feststellungen zu machen, denen zwar zunächst ausschließlich theoretischer Wert zukommt.

[20]) Die Angaben beziehen sich jeweils auf die Höhe über dem Grundwasserspiegel, der auf einem stets gleichen Niveau gehalten wurde.

Für die maximale kapillare Steighöhe, also für den Bereich der Porensättigung, die in unserer Tabelle durch die Zahl 100 zum Ausdruck kommt, wird von ATTERBERG (Köthen 1905) für einen etwa unseren Verhältnissen entsprechenden Sand eine Höhe von 131 mm angegeben. Dieser Wert ist zweifellos viel zu niedrig. Denn bereits nach 10 Tagen konnten wir in einer Höhe von 150 mm völlige Kapillarität ermitteln, die sich höchstwahrscheinlich noch über diesen Bezirk erstreckte. Eine genaue Festlegung der oberen Grenze kann hier noch nicht interessieren, weil ja der Versuch noch längst nicht abgeschlossen ist. Wir werden sogar die Höhe von 150 mm ohne weiteres auf praktisch 160 mm heraufsetzen dürfen, weil ja die Entnahmeeinrichtung diesen Bereich mit erfaßt (2 cm wirksame Weite!) und bei einem Ergebnis von 100% kein Zweifel über eine auch dort vorliegende Sättigung aufkommen kann.

Eine weitere Beobachtung ist für die im absolut trockenen Boden absteigende Feuchtigkeit zu machen. Am 23/9. finden wir eine Feuchtigkeitsanreicherung gerade in der 80-cm-Zone, von unten gemessen. Es ist wichtig zu wissen, daß kühles und feuchtes Wetter vorlag, das auch Regen brachte. Die mit Wasser angereicherte Luft „schoß" also gewissermaßen herab und behielt eine quantitativ bedeutsame Menge am unteren Ende des bewegten Bereiches bei, wie wir es auch beobachten können, wenn wir z. B. eine Flüssigkeit zu einer anderen gießen, wo sich zunächst bei geeignetem Dichtenverhältnis in der Tiefe des Gefäßes eine Anreicherung der zugefügten Flüssigkeit bildet, wie man durch entsprechende Farbgebung sichtbar machen kann. Auch in unserem Falle sucht die beschwerte Luft einen Weg nach unten, der im Bereich der 100 cm gewissermaßen eine Dehnung mit sich bringt.

Nach dem 23/9. setzte ein Wetterumschlag mit Erwärmung ein, und es ist interessant, an den hier vorliegenden Werten den Fortgang zu verfolgen:

Höhe in cm am:	24/9	25/9	26/9	27/9	3/10	5/10	7/10	8/10
175	10,8	7,4	6,3	5,8	4,7	6,2		10,7
150		4,9		4,6		5,5	5,6	
120	2,9		5,7	4,3	3,8	3,6	3,1	2,7
100				0,0		2,0	2,3	
80	3,0		5,1	5,5	15,0	?	17,1	?
50	4,3	9,9		10,2	10,8	10,8	11,1	
38								11,6
35	12,2	12,3	12,7	12,6	12,9	13,6	12,4	12,1
32					28,6		37,8	33,2
25	35,3	42,1	47,5	54,7	59,2	65,8	72,4	100
15	100	100	100	100	100	100	100	100

Wir finden im Bereich der 80-cm-Zone eine plötzliche Feuchtigkeitsabnahme in recht erheblichem Ausmaß. Später erfolgte wieder eine Zunahme, die am 9/10.[17]) ein sich gut heraushebendes Maximum lieferte.

Der Wetterumschlag zog auch wesentliche Veränderungen in den darüber befindlichen Bezirken nach sich. Wir finden überall bis zu einer gewissen Zeit eine Abnahme und später ein Umgestalten, das einem regulären Aufbau im Feuchtigkeitssystem dient.

Herauszuheben sind die Beobachtungen vom 7/10., 8/10. und 9/10.[30]) im Kapillar- und dem darüber befindlichen Rekondensationssaum. Am 8/10. reicht der Kapillarsaum bereits bis in eine Höhe von 260 mm. Die Feuchtigkeit in dem darüber befindlichen Rekondensationsbereich weist eine gewisse Abnahme gegenüber dem 7/10. auf. Diese Abnahme läßt sich bis in eine Höhe von 35 cm gut verfolgen. Wir können hierbei aussprechen, daß der Rekondensationsraum einer Begünstigung der Kapillarzone zu dienen hat. Diese hier auftretende Erscheinung wird noch weiter zu verfolgen sein.

Auffallend ist der Sprung von 72,4% Feuchtigkeitsgehalt bis zu völliger Kapillarität, der vom 7/10. bis zum 8/10. zu beobachten ist. Wir haben damit zu rechnen, daß bei einem bestimmten Feuchtigkeitsgehalt eine Vergrößerung der Kapillarität vorliegt, indem einerseits durch Wasseranreicherung eine Verkleinerung der Poren gegeben ist, anderseits aber auch stärkere Molekularkräfte völlige Porenfüllung bringen.

Man kann damit sagen, daß der kapillare Anstieg nach seiner primären, gleichförmigen Folge in eine sekundäre Phase übertritt, wo mit einzelnen Anstiegsperioden zu rechnen sein wird, wie auch weitere Nachprüfungen noch zu zeigen haben.

Rekondensation und Kapillarität ergänzen einander. Die Rekondensation wirkt vor und schafft die Möglichkeiten eines kapillaren Aufstiegs im Bereich der sekundären Zone. Da jeweils — wie es bis jetzt scheint — mit jedem kapillaren Anstieg ein Feuchtigkeitsabfall in dem darüber befindlichen Rekondensationsraum erfolgt, werden wir mit einem phasenartigen Aufstieg zu rechnen haben, der stufenförmig vor sich geht.

ATTERBERG gibt für unseren Versuchssand einen kapillaren Anstieg bis zu 131 mm an[31]). Da diese Versuche nach den kritisierten Methoden erfolgten, liegt es nahe, daß hier der sekundäre Anstieg überhaupt ganz außer acht gelassen wurde. Daß aber gerade ihm die weit größere Bedeutung zukommt, darf nach dem bis jetzt vorliegenden Ergebnis als sicher angenommen werden.

Auffallend ist die Anreicherung in der 80-cm-Zone, die sich im Laufe der Zeit immer mehr herausgestaltet. Bis zum 27/9. finden wir durchaus normale Verhältnisse, die gut in den Gesamtrahmen passen. Nachdem dort eine Untersuchungspause eingelegt wurde, um einmal für einige Zeit Störungen im Versuchsbehälter zu vermeiden, finden wir einen Anstieg, der im Verhältnis zu der in benachbarten Bezirken vorliegenden Feuchtigkeit als recht bedeutend anzusprechen ist. Zweifellos wird er auf ein Zusammenwirken der absteigenden und aufsteigenden Feuchtigkeit zurückzuführen sein, und es ist auch hierauf noch genauer einzugehen.

[30]) Vgl. S. 34.
[31]) Vgl. S. 21.

Höhe in cm am:	9/10	10/10	11/10	13/10	15/10	16/10	18/10
175	11,5	12,7	15,6	18,1	19,5	19,3	17,3
150	5,3	5,9	6,6	7,3	8,2	8,0	
120	2,8	2,8	3,0	2,9		3,4	3,7
100	2,7		6,1		9,3	9,5	9,9
80	18,3	18,7	18,9	?	19,3	19,6	19,5
50	11,4	11,8	12,0	12,5		14,4	
40							
38	12,2		12,3			12,6	
35	12,7	12,6	12,8	12,4	12,3	12,7	13,1
32	34,7	34,6	34,8	36,3	39,8	44,7	49,1
30		35,3	35,1	39,5	45,2	49,6	54,9
25	100	100	100	100	100	100	100

Höhe in cm am:	20/10	21/10	22/10	23/10	24/10
175	17,1	17,3	17,7	17,9	18,5
150	8,1	8,2		11,2	13,0
120		3,7	7,1		11,2
100		10,3	10,5	10,4	10,7
80	19,7	19,7	19,0	?	18,1
50	14,8	14,8	14,3	12,3	11,7
40		12,7	11,6	11,5	11,5
38	13,1		13,9	13,6	13,8
35	13,4	13,4	13,5	13,3	12,8
32	51,5	50,2	61,8	60,7	46,0
30	58,2	61,7	70,1	78,8	100
25	100	100	100	100	100

Die hier gebrachten Beobachtungen lassen wieder interessante Folgerungen über den kapillaren Anstieg zu und ermöglichen eine Bestätigung. Am 24/10. war volle Kapillarität bereits bis zu einer Höhe von 310 mm erreicht. Auch hier erfolgte wieder eine sprunghafte Porenfüllung auf 100%, so daß wir den schon gemachten Schluß bestätigen dürfen, daß als Folge der vorwirkenden Rekondensation erhöhte Kapillar- und Molekularkräfte auftreten müssen, wie das bereits ausgeführt wurde.

Wichtig ist die wieder stattfindende Wasserabnahme im Rekondensationsbereich unmittelbar über der Kapillarzone, die einer Förderung des Kapillarsaumes zu dienen hat.

Die bis jetzt geschilderten Beobachtungen über den kapillaren Anstieg werden wir auch weiter fortsetzen können und in den folgenden Übersichten wiederfinden.

Hervorzuheben bliebe, daß unser Maximum im 80-cm-Bereich weiter fortbesteht und nur ganz geringen Schwankungen unterliegt, die im wesentlichen auf Witterungseinflüsse zurückzuführen sein werden. Im

Bereich über einen Meter Höhe finden wir eine laufende Zunahme der Feuchtigkeit. Das ist ja auch erklärlich; denn hier folgt im Tagesrhythmus eine stetige Kondensation, die Feuchtigkeit addiert und der keine Verdunstung bzw. kein Entzug durch die Vegetation gegenübersteht, wobei allerdings atmosphärische Verdunstung nicht ausgeschlossen werden darf.

Höhe in cm am:	25/10	26/10	28/10	29/10	31/10	1/11	2/11	5/11
175	17,6	17,0	15,6	14,8	14,7	14,2	13,5	12,8
150	8,1	8,8	10,4	11,8	12,8	13,2		11,6
130					7,9	7,7		
120	5,2	6,7	9,1	9,3	11,4		10,8	
100	10,5	10,8	12,1	13,0	13,7	11,1		11,5
80	19,8		18,3		18,2		17,3	
50	14,9	14,6	10,7	8,9	6,4		18,9	
40	12,3		11,4		11,3		21,4	
38	13,3	12,8	12,5	12,4	12,7	12,7		12,8
35	13,5	13,2		13,7	13,6	13,5	13,7	13,4
32	54,6	56,0	59,2	73,6	88,7	62,7	62,7	63,0
30	65,1	68,8	77,0	82,3	89,2	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100	100

In dieser Versuchsreihe finden wir wieder die bisherigen Beobachtungen über den kapillaren Anstieg bestätigt, die sich in der bekannten Weise am 1/11. wiederholen.

Wichtig ist es zu wissen, daß mit dem 29/10. eine Zeit kalter Nächte einsetzt, es am Tage aber zu relativ hoher Erwärmung kommt. Diese Bedingungen sprechen für eine bedeutende Aktivität, die wir durch Umlagerungen in unseren Zonen gut verfolgen können.

Mit dem Einsetzen dieser Periode kalter Nächte beginnt ein Feuchtigkeitsabstieg. Er erfolgt in der Weise, daß eine Ansammlung speziell im unteren Bereich stattfindet. Man kann sehen, wie so eine Feuchtigkeitssammlung in tiefen Zonen erfolgt, die schließlich u. U. der Kapillarzone zukommt, auf jeden Fall aber einer Speicherung für kommende Vegetationsperioden zu dienen hat. Die absteigende Feuchtigkeit stammt aus den oberen Bereichen, und — wenn wir weiter gehen — werden wir sie in ihrem Ursprung zu einem Teile in der atmosphärischen Luft zu suchen haben. Allerdings ist der Weg weit, und wir dürfen auf keinen Fall mit kurzzeitigen Zusammenhängen rechnen.

Vielmehr besorgen die oberen Schichten eine Sammlung während früherer Zeitperioden, und die Kälteperiode gibt nun einen abwärts gerichteten Transport, um die in den oberen Erdbereichen kondensierten Wassermengen zur Speicherung für Zeiten eines größeren Bedarfs in die Tiefe zu führen.

Diesen Transport haben wir uns so vorzustellen, daß die vom Tage her erwärmte und infolge ihrer erhöhten Temperatur mit größeren Feuchtigkeitsmengen beschickte Luft während der Nacht, wo Abküh-

lung stattfindet, auf Grund einer gewissen Verdichtung[32]) abwärts wandert und im Laufe der Nacht einen nicht unwesentlichen Teil des von ihr gelösten Wassers als Kondenswasser abgibt, da ihre Lösungstension infolge der niedrigen Temperatur ja geringer als am Tage sein muß. Bei der am nächsten Tage wieder erfolgenden Erwärmung wird zweifellos ein Ansteigen stattfinden. Doch diese Vorgänge können nicht zu einer wesentlichen Feuchtigkeitsabnahme in den tieferen Bereichen führen, weil die Erwärmung langsam erfolgt und die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasser in ihrer Stärke damit keinesfalls zu ihrer Aufstiegsmöglichkeit parallelisiert werden darf. Wir können bereits aussprechen, daß wir zu Zeiten einer geringen oder nicht nennenswerten Vegetation, die letzten Endes von der Temperatur her bedingt ist, eine negative Aktivität im Bereich der Feuchtigkeitsstruktur des Erdbodens zu verzeichnen haben, wobei durch den Begriff des „Negativen" lediglich die Richtung ausgedrückt sein soll. Es wird interessieren, diese Vorgänge noch weiter zu verfolgen.

Im Bereich der 130 cm finden wir ein Feuchtigkeitsminimum, das wir als Dehnungszone[33]) aufzufassen haben. Hier bleibt der Feuchtigkeitsgehalt so gut wie konstant. Demnach werden wir hier die zur Befriedigung erforderliche Feuchtigkeit vorfinden, wobei Kapillarkraft des Gesteins und Lösungstension der Luft miteinander im Gleichgewicht stehen.

Verfolgen wir zunächst die Vorgänge weiter:

Höhe in cm am:	6/11	7/11	8/11	9/11	10/11	11/11	17/11	24/11
175	12,5	11,8	11,9	11,8	12,3	13,1	13,6	11,7
150	11,4	11,3		11,3	11,8	12,1	12,4	9,1
130	7,8	8,0	8,1	8,4	9,2	9,7	9,9	9,6
120	10,6	10,2	10,4	10,0	9,6	9,4	9,3	9,1
100	11,8	11,6	11,7	11,2	9,8	9,3	8,6	8,7
80	17,5	17,1	16,2	16,0	14,9	13,7	13,2	16,1
50	19,1	18,8	18,8	18,6	18,7	18,7	18,1	16,0
40	21,6				13,6			13,2
38	12,6	13,4	19,5	19,8	15,3	15,0	14,7	14,3
35	13,7	15,0	24,8	26,1	17,5	17,6	14,3	15,4
32	64,2	65,9	67,0	73,1	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100

Die Zeit der kalten Nächte bekommt mit dem 9/11. einen plötzlichen Umschwung mit relativ zur Jahreszeit bedeutender Erwärmung. Die Temperatur wird ausgeglichener, ausschließlich gegen Mittag sind für unsere Versuche bedeutsame Temperaturerhöhungen feststellbar.

Mit dem Einsetzen dieses Wetterumschlages wird auch der kapillare Anstieg gefördert. Zweifellos wäre ebenfalls bei kaltem Wetter mit einem Aufsteigen zu rechnen gewesen. Doch würde das voraussetzen, daß das am 6/11. bei 40 cm befindliche Feuchtigkeitsmaximum bis zur

[32]) Wasser hat bekanntlich bei + 4° ein Dichtemaximum.
[33]) Vgl. Seite 45.

oberen Grenze des Kapillarsaumes vorgedrungen wäre. Wir werden Gelegenheit haben, einen hiermit in Zusammenhang stehenden Anstieg noch später zu beobachten.

Der Temperatur-Umschlag bringt eine völlige Verlagerung des Feuchtigkeitsgehaltes mit sich. Wir finden wieder ein Rückschreiten zum ursprünglichen Zustand, von der Feuchtigkeitsstruktur aus gesehen. Am 24/11. ist in der 80-cm-Zone ein Maximum zu finden, wie es dort schon früher beschrieben wurde. Von da erfolgt nach beiden Richtungen ein ganz regulärer Aufbau, der uns bereits bekannt ist.

Die hier in der Kältewelle gemachten Beobachtungen geben notwendig die Veranlassung, auch später bei bedeutenden, noch bevorstehenden Kälteperioden eine sorgfältige Beobachtung folgen zu lassen.

Im Bereich des kapillaren Anstiegs vom 9/11. zum 10.11. finden wir wieder eine Abnahme in den unmittelbar über dem Kapillarsaum befindlichen Rekondensationsbezirken.

Für die nun folgenden Untersuchungen gewinnt Schneefall Bedeutung. Da genauere Untersuchungen über den Einfluß des Schnees für die Bodenfeuchtigkeit in unserem Rahmen noch nicht vorlagen, wurde der Schnee mit einbezogen. Die sonst den Behälter bei Niederschlägen abdichtende Glasscheibe war also entfernt, und es konnte eine drei bis vier Zentimeter starke Schneedecke einbezogen werden. Nach dem Schneefall, der am 13/12. und 14/12. erfolgte, fand eine allmähliche Erwärmung statt, die innerhalb eines Zeitraumes von zehn Tagen als Minimaltemperatur + 5° C erreichte. Die dadurch gegebenen Versuchsbedingungen waren äußerst günstig, und da später kein weiterer Schneefall stattfand, konnten grundlegende Beobachtungen gemacht und bereits ausgesprochene Vermutungen bestätigt werden.

Höhe in cm am:	1/12	7/12	8/12	9/12	15/12	21/12	Schneefall 23/12	24/12
175	11,6	11,8	11,7	11,7	14,8	21,5	23,7	23,4
150	9,1	9,2	9,1	9,0	11,5	16,2	18,6	21,4
130	9,2	8,7	8,8	8,7	9,3	12,7	15,9	18,3
120	8,8	8,9	8,5	8,4	8,5	9,7	11,6	14,5
100	8,4	8,3	8,3	8,1	8,0	8,2	9,8	12,6
80	16,3	16,5	16,2	16,3	16,1	16,8	17,0	17,2
50	13,3	13,5	13,0	13,2	17,6	19,4	20,2	20,5
40	12,8			12,3		14,7		15,8
38	13,9		13,5		13,8	14,6	15,1	16,2
35	15,8			16,2	17,6	17,8	18,1	19,3
32	100	100	100	100	100	100	100	100

In dieser Aufstellung sind bereits Ansätze einer Feuchtigkeitsbewegung nach unten sichtbar; die nächste Übersicht veranschaulicht in dieser Hinsicht eine wesentliche Begünstigung, die durch die Schneeschmelze gegeben ist und einen Beleg für die Bedeutung des Schneefalls im Hinblick auf eine Feuchtigkeitssammlung gibt, die letzten Endes wieder der Vegetation zukommt.

Höhe in cm am:	25/12	26/12	27/12	28/12	29/12	30/12
175	47,1	62,9		63,1		61,2
150	35,4		36,8		32,4	
130	20,6	46,2	42,8		34,9	
120	17,1		48,5	46,1		31,2
100	12,8	15,5	29,6	50,7	48,4	
80	17,1	17,8	19,8	35,1	56,0	53,6
50	20,6	20,4	20,7	27,3	49,1	62,4
40		16,1		16,3	18,2	
38	15,8	17,0	18,9		18,3	27,1
35	19,8	21,3	26,7	31,1	37,5	43,2
32	100	100	100	100	100	100

Höhe in cm am:	31/12	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1
175		60,4		62,3	61,8	62,0
150	33,8		30,7		29,2	29,6
130	27,2		25,3	22,1	20,8	19,1
120	23,7	21,6	20,7	20,2	19,9	19,5
100	22,8		23,6	23,5	23,8	
80	47,3	38,5	36,2		30,4	31,2
50	64,4	48,3		37,1		32,4
40	55,9	71,3	51,3	50,7	50,5	52,9
38		54,2	74,4	74,2	68,8	69,1
35	48,8	52,8	73,8	75,2	100	100
32	100	100	100	100	100	100

Die Schneeschmelze brachte zunächst eine völlige Kapillarität in den oberen Zonen der Humusdecke, wie sich messen ließ. Auf Grund der Temperatursteigerung, die nach und nach bis zu $+4°$ C und darüber als Temperaturminimum erfolgte, war ein Absinken der Luft, die fast oder ganz mit Feuchtigkeit gesättigt war, die notwendige Folge, und es setzte so ein Wassertransport nach unten ein, der schließlich sogar bei seiner Ankunft unmittelbar über dem Kapillarsaum ein Ansteigen des Kapillarwassers nach sich zog. Die abwärts bewegten Mengen wurden recht bedeutend. Die Tendenz nach unten kommt auch aus den Zerrgebieten im Bereich der 120- und 130-cm-Zone in unserer Aufstellung gut zum Ausdruck.

Vielfach werden wir im Winter nur geringen oder auch überhaupt keinen Schneefall haben. Man könnte bei oberflächlicher Betrachtung daraus den Schluß ziehen, daß damit eine Begünstigung für die Vegetation unmöglich sei. Aber auch schon Regen und in gewissem Maße

Tau können durchaus die Rolle des fehlenden Schnees übernehmen. Denn es ist ja daran zu denken, daß bis zu + 4° C und auch noch etwas darüber eine abwärts gerichtete Feuchtigkeitsbewegung stattfindet.

Die verhältnismäßig große Geschwindigkeit, mit der dieser Vorgang erfolgt, muß als sehr wichtig angesehen werden. Da ja oft infolge plötzlicher Wetterumschläge nur kurze Zeiten zur Abwanderung zur Verfügung stehen, kommt der Beweglichkeit dieser Vorgänge höchster Wert zu.

Die Schneedecke stellt zugleich in gewisser Weise einen Abschluß nach oben dar. Es kann keine Feuchtigkeit, die sich einmal im Boden befindet, verloren gehen. Fehlt der Schnee, so übernimmt Frost seine Rolle. Das Wasser der obersten Bodenschichten gefriert und schafft infolge seiner Volumenvergrößerung ebenfalls einen Abschluß, der natürlich mit dem Beginn wärmerer Perioden sofort aufgehoben ist. Doch es wird der Verlust durch Verdunstung zunächst nicht groß sein, da ja die Feuchtigkeitsbewegung vorerst nach unten gerichtet ist.

Den Zerrgebieten, die auch bei unserem Versuch zu finden waren, kann infolge Feuchtigkeitsmangel bei starkem Frost kein völliger Porenverschluß zukommen, was nicht nur überflüssig wäre, sondern auch von größtem Schaden für die Pflanzenwelt sein müßte. Denn in diesen Zonen finden wir feine Wurzeln, denen Frost und insbesondere der bei nahezu erreichter Kapillarität auftretende Druck schaden könnten. In den tieferen Bezirken, wo über dem unteren Kapillarsaum eine Wasseranreicherung erfolgt, ist naturgemäß mit Frost nicht mehr in der erforderlichen Stärke zu rechnen.

Aus diesen Betrachtungen wird ein außerordentlich feines Ineinanderspiel verschiedenster Faktoren deutlich, das für eine Ermöglichung organischen Lebens schließlich die Grundlage überhaupt bildet. Von den nun folgenden Zeitabschnitten werden mehr Stichproben zur Kontrolle gegenüber den Temperatur- und Witterungsverhältnissen interessieren. Da — wie schon erwähnt — kein weiterer Schneefall stattfand, wurde ein Eindringen der Niederschläge durch eine entsprechende Abdachung wie schon früher vermieden.

Höhe in cm am:	6/1	12/1	19/1	26/1	9/2	16/2	1/3	15/3	2/4
175	57,2	36,1	34,2	33,5	33,6	33,3	31,5	29,2	32,1
150	25,8	21,4	23,0	22,2	23,2	23,1	22,4	21,4	24,6
130	18,3	17,8	17,5	16,6	15,4	12,8	13,0	15,2	17,5
120		16,3	14,3	13,9	11,6	10,4	9,7	11,6	18,5
100	20,5	22,6	21,9	20,7	18,3	16,5	16,6	19,2	21,7
80	27,3	47,3	27,0	26,2	34,9	35,1	32,4	46,0	50,2
50	31,6	36,9	24,1	22,5	63,0	64,2	58,7	51,3	33,0
40	54,4	40,7	66,8	69,1	70,6	70,7	71,2	56,8	37,2
38	68,7	42,1	72,2	73,4	73,1	73,3	71,9	58,1	42,6
35	100	100	100	100	100	100	100	62,4	55,7
32	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Während der Beobachtungszeiten vom 11/1. bis 21/1. herrscht wieder mehr mildes Wetter vor. Wir finden Temperaturen bis zu + 15° C, die eine relativ bedeutende Aktivität bedingen. Hierbei entstehen wieder völlige Umlagerungen, und erst eine abermals danach einsetzende Kälteperiode schafft den für die Wintermonate typischen Zustand.

Mitte März setzt deutlich eine Veränderung ein, und wir finden eine Feuchtigkeitsumlagerung, aus der eine aufsteigende Tendenz spricht. Wir nähern uns ja auch den Perioden besonders ausgeprägten Wachstums im Pflanzenreich, wo gerade in den oberen Bezirken des Erdbodens ein bedeutender Wasserbedarf herrscht. Denn in diese Bezirke reichen ja die Wurzeln der ganz besonders im Wasserhaushalt zu fördernden Pflanzenwelt.

Auffallend ist die Abnahme der Kapillarität, die bei der letzten Beobachtung festzustellen war. Zweifellos wird auch diese Erscheinung durch den Feuchtigkeitsaufstieg verursacht sein. Hier tritt zum ersten Male klar in Erscheinung, wie der Kapillarsaum Feuchtigkeitsreservoir darstellt und sein Niveau keine konstante Größe ist, sondern Schwankungen unterliegt, die vom jeweiligen Bedarf abhängen.

Es wird interessieren, wie weit der Kapillarsaum zurückgegangen ist. Um das zu untersuchen, wurde der Behälter in einem Durchmesser von 1 cm bei 33 cm über dem Grundwasser angebohrt. Die hierbei entstehende Öffnung gestattet eine einmalige Entnahme am Rande des Behälters, wo ein Nachsinken des Gesteins infolge der weiter in der Mitte des Behälters befindlichen Lagerung der Entnehmer nichts schadet. Die Untersuchung ergab einen Feuchtigkeitsgehalt von 92,37%. Das war ein Zeichen dafür, daß der Kapillarsaum noch etwas tiefer als 33,5 cm liegen mußte, und er wurde durch eine nochmalige Prüfung bei 33 cm ermittelt, indem die Spitze des Bohrers bei 32,5 cm zum Ansatz gelangte.

Die bei solchen einmaligen Kontrollmessungen durchgeführten Störungen müssen hinsichtlich der Luftundurchlässigkeit des Behälters wieder beseitigt werden. Das gelingt durch Einsetzen einer entsprechenden Korkscheibe, wobei die Poren mit Paraffin ausgegossen werden und auf das Ganze noch ein Leukoplastpflaster gebracht wird, das mehr einen mechanischen Schutz zu erfüllen hat.

Im Anschluß an unsere neuen Beobachtungen, die ein Sinken des Kapillarsaumes mit sich brachten, wird die Frage akut, ob wir unter vollends natürlichen Bedingungen auch mit einer Verminderung des Kapillarbereiches zu rechnen haben.

Die Antwort wird verneinend ausfallen müssen. Es wird sogar zu sagen sein, daß eher ein Anstieg des Kapillarsaumes während der Monate März, April und Mai stattfindet. Denn wir haben zu bedenken, daß der Grundwasserspiegel während dieser Monate besonders hoch liegt.

Unsere weiteren Untersuchungen, die ebenfalls mehr als Stichproben über längere Zeiten gelten, belegen. wie im Behälter der Zustand erreicht wird, den wir bei Beginn unserer Untersuchungen nach einer gewissen Zeit als typische Sommerstruktur fanden. Hier wird der Kreis geschlossen, der erstmalig ein anschauliches Bild über die Feuchtigkeitsverhältnisse im Erdboden geben soll.

Höhe in cm am:	16/4	25/4	6/5	17/5	31/5	14/6	30/6
175	35,7	36,0	35,3	36,8	38,5	34,2	36,8
150	26,0	27,2	26,7	27,4	28,6	26,8	27,3
130	19,6	21,0	22,1	21,8	22,5	22,7	22,4
120	18,5	17,0	19,4	19,0	19,0	17,9	17,8
100	21,7	20,4	17,8	18,0	16,7	17,2	16,3
80	51,3	47,0	45,8	42,6	45,5	46,1	46,7
50	28,4	26,4	24,9	22,5	22,3	22,0	22,7
40	31,8	33,5	28,2	26,8	27,1	27,0	26,6
38	38,4	52,9	45,0	43,7	46,8	49,3	48,6
35	55,7	67,1	100	63,8	71,5	100	100
32	100	100	100	100	100	100	100

Die ermittelten Werte sind charakteristische Daten, die der Vegetationsperiode entsprechen. Die Umlagerungen schaffen wieder im Bereich der 80-cm-Zone ein gewisses Maximum, das sich aus der übrigen Gliederung heraushebt.

Die Feuchtigkeitsanreicherung in einer mittleren Zone können wir auch bei Untersuchungen im freien Erdboden beobachten. Dabei dürfen wir allerdings nicht unberücksichtigt lassen, daß gewisse Differenzierungen durch eine unregelmäßige Struktur des Bodens eintreten müssen. Aber trotz allem ist die Erscheinung unverkennbar.

Als Beispiel seien zwei Beobachtungen der Arbeit über „Ab- und aufsteigendes Bodenwasser" von H. SCUPIN (Halle 1935 b) entnommen. Die Beobachtungen stammen von Bohrungen im Mai 1934, die im Bereich der Saale und Elster südlich von Halle durchgeführt wurden. Neben dem gefundenen Feuchtigkeitsgehalt sei auch gleich das Profil angegeben:

Beispiel 1

	0,10—0,20 Meter	— 13,86% H_2O	
	0,35—0,45	— 13,41%	Mutterboden und
	0,60—0,70	— 8,69%	sandiger, brauner Lehm
	0,80—0,90	— 17,38%	
	1,00—1,10	— 17,42%	
	1,20—1,30	— 16,74%	
	1,45—1,55	— 15,42%	
+++	1,65—1,75	— 18,17%	
	1,85—1,95	— 12,80%	
	2,05—2,15	— 17,63%	
	2,25—2,35	— 20,61%	
	2,50—2,60	— 24,56%	
	2,70—2,80	— 24,27%	
	2,90—3,00	— 25,41%	Toniger, grauer Sand
	3,10—3,20	— 26,18%	
	3,30—3,40	— 30,96%	
	3,55—3,65	— 25,68%	

Beispiel 2

	0,30—0,40 Meter	— 14,84% H_2O	
	0,70—0,80	— 16,84%	Mutterboden und brauner Lehm
	1,10—1,20	— 18,98%	
	1,50—1,60	— 19,84%	
+++	1,90—2,00	— 22,82%	
	2,70—2,80	— 20,94%	Grauer, sandiger Ton
	3,10—3,20	— 25,40%	
	3,30—3,40	— 22,00%	
	3,50—3,60	— 24,72%	Grauer, sandiger Ton und Kies mit Wasser

Die Feuchtigkeitsangaben beziehen sich bei diesen Beobachtungen auf das Gesamtvolumen. Weiter ist zu berücksichtigen, daß die einzelnen Werte die Mittel einer Zone von jeweils 10 cm Mächtigkeit bezeichnen. Auch Wechsel im Gestein bringt hydrologische Änderungen mit sich. Besonders aus den ersten Momenten muß ein gewisser rechnerischer Ausgleich erfolgen, der die Minima und Maxima zum Gesamtdurchschnitt verlagert. Unter Berücksichtigung dieser Verhältnisse kommen jedoch die Anreicherungsgebiete gut zum Ausdruck.

Eine weitere Klärung wird am besten dadurch gegeben, daß ein besonderer Versuch mit gleichem Gestein wie bisher in einem d r e i Meter großen Behälter zur Durchführung gelangt. Die technische Einrichtung hat im übrigen genau der beschriebenen des bereits durchgeführten Versuches zu entsprechen.

Der Versuch wurde so durchgeführt, daß Untersuchungen während der Sommermonate 1936 möglich waren. Einige Versuchsergebnisse veranschaulichen ein gutes Bild. Die Daten sind willkürlich genommen.

Höhe im cm am:	8/7	20/7	1/8	20/8 (1936)
280	13.8	14,7	14,4	16,8
220	4,6	5,2	6,1	6,9
200	3,0	4,1	3,7	3,8
190	16,4	18,3	18,9	17,5
180	8,3	9,0	8,6	9,2
170	5,1	6,8	6,4	6,8
120	7,3	9,2	8,6	7,7
60	9,2	11,7	10,5	9,9
30	36,7	33,0	35,1	37,6
25	100	100	100	100

Wir finden das Maximum etwa im Bereich der 190-cm-Zone.

Man wird sagen müssen, daß die über dem Maximum liegende Feuchtigkeit auch z. T. von außen (Niederschläge, Tau, Wassergehalt der atmosphärischen Luft), die unter dem Maximum vom Kapillarsaum stammt. Mit diesen Feststellungen ist aber nicht zum Ausdruck gebracht, daß oberhalb des Maximums eine reguläre Bewegung nach

unten und unterhalb des Maximums nach oben stattfindet. Gerade im oberen Bereich werden wir tagsüber wesentliche Schwankungen haben, indem mit wechselnden auf- und abwärts gerichteten Luftbewegungen zu rechnen ist. Setzt im oberen Bezirk ein starker Wasserverbrauch durch Pflanzenaufnahme oder Verdunstung ein, so wird das mittlere Maximum als ein gewisses Reservoir aufzufassen sein, das seine Auffüllung auf dem Wege über die Rekondensation vom Kapillarbereich aus erhält bzw. bei einem Fortfall durch Aufbrauch einen unmittelbaren Weg des aufsteigenden Rekondensationswassers freigibt.

Ziehen wir die Untersuchungen von WRANGELL[34]) in den Kreis der Betrachtungen, so ist hier das Maximum offensichtlich bis an die Oberfläche verschoben, da jeder Feuchtigkeitszutritt von außen wesentlich vermindert ist.

Nach den bisherigen Befunden werden auch grundlegende Aussagen über die kapillare Steighöhe möglich sein. Daß die Angaben von ATTERBERG[35]) unzureichend sind, wurde bereits belegt. Neu tritt die Frage auf, ob es denn überhaupt möglich ist, für die kapillare Steighöhe absolute Werte anzugeben.

Diese Frage muß verneint werden. Wir haben ja gesehen, daß die Kapillarität Schwankungen unterliegt, die abhängig sind vom Wasserbedarf in den darüber befindlichen Bodenschichten, dann aber auch von Temperatur und jahreszeitlichen Bedingungen. Werden die Versuche mit Glasröhren über lange Zeiträume ausgedehnt, so sind wohl auch hier solche Schwankungen feststellbar. Man kann gewiß die Temperatur im Versuchsraum konstant halten; dann aber werden wieder viel zu niedrige Werte entstehen, da ja der kapillare Anstieg durch Temperaturschwankungen und die damit in Zusammenhang stehende Rekondensation gefördert wird.

Alle vorliegenden Angaben über die kapillare Steighöhe in Gesteinen können ausschließlich theoretischen Wert haben. Viel richtiger ist es, wenn wir die Ergebnisse als Verhältniszahlen auslegen, die einen Vergleich zwischen verschiedenen Gesteinen ermöglichen. Das setzt selbstverständlich voraus, daß die Versuche unter gleichen Bedingungen, d. h. zu gleicher Zeit am gleichen Ort durchgeführt werden.

Verstehen wir von dieser Perspektive her die ATTERBERGschen Untersuchungen, so werden sie in diesem Rahmen durchaus von Wert sein, indem ihnen die Möglichkeit des Vergleiches zukommt, der Aussagen über die Abhängigkeit der Kapillarität vom Porenvolumen und der Gesteinsart zuläßt.

Feuchtigkeitsuntersuchungen mit Löß

Die physikalischen Eigenschaften der bisher untersuchten Gesteine geben der die Feuchtigkeit transportierenden Luft freie Mobilität. Ganz anders liegen die Verhältnisse beim Löß, der von einer bestimmten Feuchtigkeitsmenge ab, die mit 65% Wassergehalt (bezogen auf das Porenvolumen) anzusetzen ist, eine besonders ausgeprägte Affinität zu Wasser zeigt und damit nicht allein als das Wasser tragende Schicht

[34]) Vgl. Seite 25.

[35]) Vgl. Seite 21.

im Bereich der Grundwasserhorizonte wirkt, sondern eine schlechte Verbindung in vertikaler Richtung erwarten läßt.

Über die Feuchtigkeit im Löß sind ein paar allgemeine Bemerkungen bei K. KEILHACK (Berlin 1935, S. 86) zu finden:

„Es scheint indessen, als ob aus dem Löß überhaupt kein Wasser an den tieferen Untergrund abgegeben wird, oder höchstens dann, wenn die Mächtigkeit der Lößdecke nur einige dm beträgt und wenn die Menge der jährlichen Niederschläge größer ist als 7—800 mm; bei größerer Mächtigkeit scheint alles vom Löß aufgenommene Wasser in ihm unter dem Einfluß der Verdunstung, der Kapillarität und der wasserverbrauchenden Vegetation in der Lößdecke selbst in bald auf-, bald absteigender Bewegung sich zu befinden."

Besonders im letzten Satz kommt die Wirkung der Rekondensationsvorgänge klar zum Ausdruck, wenn zwar auch der Begriff „Rekondensation" noch nicht gebraucht wird. Wie überall wirken auch beim Löß die drei Faktoren der Kapillarität, Verdunstung (besser zu ersetzen durch Rekondensation) und Vegetation. Hinzu kommt als maßgebend eine sehr beträchtliche Größe der Kapillarität, die schließlich bei reicher Wasseraufnahme durch eine bedeutende Affinität bereichert wird und damit den Löß als praktisch wasserundurchlässig und zugleich aber auch als ein sehr gutes Reservoir erscheinen läßt. Innerhalb der bewurzelten Bodenzone ist Löß allerdings nicht völlig wasserundurchlässig.

Die Untersuchungen mit Löß wurden in gleicher Weise durchgeführt. Es ging besonders darum, das Wesen der Kapillarität im Löß klarzustellen und daraus Schlüsse auf gewachsenen Boden zu ziehen. Der Versuchsbehälter war in gleicher Weise konstruiert wie bei früheren Untersuchungen. Es blieb lediglich zu überlegen, ob nicht wegen gesteigerter Kapillarität eine Länge von 3 m erforderlich gewesen wäre. Nach den aus anderen Versuchen gewonnenen Erfahrungen schien eine größere Steighöhe als zwischen 1 und 2 m kaum vorzuliegen.

Die Untersuchungen[36]) lieferten folgendes Bild:

Höhe in cm am:	8/4	9/4	10/4	11/4	12/4	13/4	14/4	15/4
175								
150								
130								
110								
90								0,7
70							0,6	2,6
50						0,8	1,4	100
40					0,2	1,7	100	100
35			0,2	0,4	0,3	100	100	100
30			0,8	0,7	0,4	100	100	100
25	0,3	1,5	1,8	2,2	100	100	100	100
20	0,8	2,1	100	100	100	100	100	100
15	3,4	100	100	100	100	100	100	100

[36]) Versuchsbeginn am 7. 4. 1936; Dichte des Löß 1,43; Porenvolumen 48%.

Schon bei Beginn des Versuches zeigen sich ganz andere Verhältnisse als beim Sand. Die Kapillarität bewirkt durch ihre Größe ein schnelles Ansteigen, das ohne Rücksicht auf den darüber befindlichen Rekondensationsraum erfolgt.

Höhe in cm am:	16/4	17/4	18/4	19/4	20/4	21/4	22/4	23/4
185							0,2	0,5
175								
150								
130								
110				0,1	0,1	0,1	0,3	0,4
90	0,9	1,2	1,1	1,0	1,1	1,3	0,9	1,0
70	2,6	2,8	2,9	3,0	3,2	3,6	3,7	3,7
50	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100

Mit der Zeit läßt die Geschwindigkeit des kapillaren Anstiegs im Löß nach. Bemerkenswert ist, daß von oben her zunächst keine Abwanderung stattfindet, sondern erst nach zwei Wochen Spuren unterhalb der Lößdecke zu finden sind. — Verfolgen wir den Verlauf des Versuches weiter:

Höhe in cm am:	25/4	27/4	29/4	3/5	10/5	17/5	24/5	31/5
185	0,6	0,9	1,0	1,4	2,2	2,8	3,6	4,1
175			0,4	0,7	1,1	1,3	1,9	2,5
150					0,2	0,4	0,8	1,4
130								0,5
110	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4
100	0,4	0,5	0,5	0,5	1,8	2,5	2,9	3,2
90	1,0	0,8	1,3	2,4	2,7	3,6	3,9	12,6
80	1,3	5,8	9,1	10,4	11,7	36,2	100	100
70	6,7	13,2	28,3	42,4	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100

Höhe in cm am:	7/6	14/6	21/6	28/6	5/7	12/7	19/7	26/7
185	4,9	8,7	11,3	13,6	15,3	19,6	26,4	32,9
175	2,8	3,5	5,2	7,0	8,6	10,3	12,7	18,5
150	2,1	2,6	2,7	3,3	4,6	7,8	9,5	11,3
130	1,2	6,6	8,4	14,3	22,8	37,1	61,2	100
110	0,4	9,3	24,7	46,1	100	100	100	100
100	4,8	23,8	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100

Höhe in cm am:	2/8	9/8	16/8	23/8	30/8	6/9	13/9	15/9
185	37,5	42,7	41,2	37,4	39,5	37,8	32,8	37,6
180			35,1	34,6	35,3	35,0	35,2	34,7
175	23,8	27,4	35,2	34,7	34,8	34,5	34,7	34,6
165			35,1	35,3	34,8	34,3	34,5	34,7
160			33,2	32,7	32,4	32,8	32,5	32,9
155			34,6	34,2	35,1	33,8	33,1	33,3
150	15,6	21,8	34,7	36,2	34,1	32,3	36,4	33,7
147			62,3	100	100	100	100	100
130	100	100	100	100	100	100	100	100

Genauere Untersuchungen weisen auf eine maximale Kapillarität, die gemäß der Weite der Entnehmer bei 148 cm liegt. Eine Veränderung ist während der folgenden Beobachtungen nicht feststellbar.

Auch der Rekondensationsraum darüber zeigt keine wesentlichen Schwankungen. Die scharfe Grenze zwischen der Kapillarität bei 147 cm und der Rekondensation bei 149 cm, die während der folgenden Untersuchungen immer identisch bleibt, weist darauf hin, daß von einer obersten Grenze der Kapillarität viel anschaulicher als beim Sand gesprochen werden darf. Sie ist in unserem Falle durch die Verdunstung über dem Kapillarsaum gegeben, die hier als Vermittlerin eines Gleichgewichtes aufgefaßt werden muß. Von dem Verhältnis dieses Gleichgewichtes ist wiederum die Höhe des Kapillarsaumes abhängig.

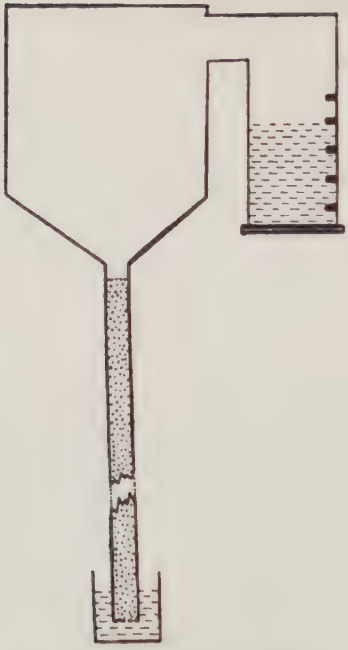
Deshalb wird man auch für Löß keine genau zu fixierende kapillare Steighöhe angeben können, sondern man wird die gefundenen Werte mehr als Vergleichsmittel aufzufassen und zu gebrauchen haben.

Die gesamte Feuchtigkeitsstruktur weist auf eine gewisse Trägheit gegenüber den Verhältnissen bei Sand hin. Die Differenziertheit im Rekondensationsraum fällt fort, weil der Bereich oberer Kapillarität nicht ausgeprägt ist, da die zur Verfügung stehende Feuchtigkeit zur Befriedigung der Wasserkapazität noch nicht ausreichte. Der Löß bietet eine gewisse Übertragung der durchgeführten Sandversuche auf natürliches Bodenmaterial. Denn die Affinität zu Wasser ist zu einem guten Teile trotz der Trocknung gewahrt, was praktisch einer Angleichung an natürliche Gegebenheiten in einem größeren Maße entspricht.

Über Einwanderung von Wasserdampf der Luft

Abschließend wäre noch die Frage zu behandeln, wie weit ein Eindringen von Feuchtigkeit aus der atmosphärischen Luft in den Erdboden erfolgt.

In Laien- und auch Fachkreisen ist oft die Meinung verbreitet, daß infolge der Tagesrhythmen eine Einwanderung gesättigter Luft unmittelbar in die Poren des Erdbodens erfolgen könne und hier für eine Feuchtigkeitsanreicherung durch Kondensation wesentlichen Anteil habe. Vielfach stellt man sich den Vorgang derart vor, daß ein Einpressen auf Grund des Absinkens der durch Abkühlung mit Wasser angereicherten Luft erfolgen müsse, ohne daß allerdings bestimmte



Untersuchungen und Mengenangaben in der Literatur vorliegen. Gerade Vorstellungen, die nicht bewiesen sind, aber auf mündlichem Wege nahezu als selbstverständlich weitergegeben werden, verlangen Belege.

Um zur Klärung dieser Frage beizutragen, wurde ein Versuch durchgeführt. Ein 2 m langes Glasrohr, das unten mit einer Gaze verschlossen war, wurde mit trockenem Sand gefüllt. Der Durchmesser des Rohres betrug 3 cm. Unten tauchte dsa Rohr in einen Behälter mit Wasser ein, das dem Grundwasser zu entsprechen hatte.

Auf dem Glasrohr war eine Glocke aufgesetzt und hieran wurde eine Mensur angeschlossen, die bis zu einer bestimmten Marke mit Wasser gefüllt war. Sämtliche Teile wurden luftdicht verschlossen, was durch Wechsellagerung von Paraffin und Leukoplast gelang. Auf diese Weise mußte sich im Versuchsbehälter ein in sich geschlossener Versuchsraum bilden mit der Tendenz einer Sättigung, da ja flüssiges Wasser in ausreichender Menge vorhanden war. Bei den täglichen Schwankungen hätte man mit einer Kondensation zu rechnen gehabt, die einen Feuchtigkeitstransport in den Sand bewirken müßte. Der dadurch gegebene Wasserverbrauch wäre an der Mensur abzulesen.

Der Versuch lief vom 2. Juli bis zum 28. August 1936 ohne jeden Erfolg. Eine Wasserverminderung in der Mensur war nicht festzustellen. Um nun künstlich eine Beschleunigung herbeizuführen, wurden nach dieser Zeit regelmäßig morgens Eispackungen durchgeführt, die eine Kondensation nach sich zogen. Die Glaswände des Behälters beschlugen und mit der Zeit war eine Abnahme in der Mensur festzustellen, die in 12 Tagen einen ablesbaren Wasserverlust von 1,6 ccm

lieferte. Diese Wassermenge, die für den Versuchsraum immerhin bedeutend war, mußte in den Sand transportiert worden sein.

Die Eispackungen erfolgten so, daß eine Beeinflussung der im Gestein befindlichen Luft nach Möglichkeit ausgeschaltet war oder doch nur in sehr geringem Maße erfolgte. Das geschah in der Weise, daß die Eispackungen nur in den oberen Bezirken des Luftraumes über dem Gestein durchgeführt wurden. Deshalb konnte eine Beeinflussung von Kondensationsvorgängen innerhalb der Poren des Gesteins im wesentlichen ausgeschlossen werden.

Nach der Versuchszeit erfolgte eine Prüfung des Feuchtigkeitsgehaltes in dem Rohr. Dabei zeigte es sich, daß ein Aufstieg der Feuchtigkeit infolge geringer Temperaturschwankungen nur etwa bis zu einer Höhe von 65 cm vorlag. Darüber war der Sand absolut trocken, und erst die oberen vier Zentimeter lieferten wieder Feuchtigkeit, die sich sehr wesentlich steigerte, indem die Zone von 3—4 cm 5,8% und die Zone von 0—1 cm 68,3% Feuchtigkeit lieferte. Diese Werte sind für sich allein auf den Verlust in der Mensur bezogen zu gering, dürfen aber als zutreffend angesprochen werden, wenn man bedenkt, daß auch die Wände des Luftraumes beschlagen waren und hierauf zweifellos der größte Anteil entfiel.

Durch diesen Versuch wurde aber belegt, daß die gesamte primär kondensierte Feuchtigkeit im oberen Kapillarsaum abgesetzt wird. Erst von hier haben wir eine abwärts gerichtete Rekondensation zu erwarten, der alle die Erscheinungen zuzuschreiben sind, über die inzwischen berichtet wurde. Der obere Kapillarsaum ist also Zwischenstation. Durch die hier bedingte Wasseranreicherung ist wiederum der jungen Vegetation gedient, deren Wurzeln sich zunächst auf obere Zonen beschränken und die für ein schnelles Wachstum viel Wasser benötigen.

Beobachtungen über Tages-Schwankungen

Eine Erscheinung, die jedem auffällt, ist der Tau. Seine Bildung hängt ab von der wechselnden Lufttemperatur, mit der wiederum die Aufnahmefähigkeit der Luft für eine bestimmte Feuchtigkeitsmenge in Verbindung steht. Wird die hier notwendig gegebene oberste Grenze überschritten, so erfolgt Ausscheidung der überschüssigen Wassermenge, es tritt Kondensation ein. War also eine relativ warme Luft im Laufe des Tages ganz oder nahezu mit Wasser gesättigt, so muß bei der in der Nacht folgenden Abkühlung ein Teil des Wassers tropfbar flüssig ausgeschieden werden. Dieser Vorgang erfolgt nicht nur über der Erde, sondern auch in der Erde (Rekondensation).

Rekondensation und Tau sind lokal gebunden, weil eine Luftbewegung stattfindet. Nur so wird es überhaupt möglich sein, daß sich der Tau in derart bedeutenden Mengen absetzt. Die sich abkühlende Luft sinkt nach unten, findet an der Erdoberfläche die zur Wasserabgabe nötigen Molekularkräfte, um dann durch diesen damit verbundenen Gewichtsverlust wieder aufzusteigen und anderen Luftmengen Raum zu geben. So wird zu einer Anreicherung beigetragen.

Der Tau bedeutet eine Wasserzuführung in den Erdboden, verhindert aber auch Austrocknung. Denn ehe die Bodenfeuchtigkeit zur Ver-

dunstung gelangt, muß erst der am Morgen gebildete Tau wieder von der Luft aufgenommen werden.

Die Feuchtigkeitsbildung im oberen Rekondensationsraum braucht mit dem Tau nicht in unmittelbarem Zusammenhange zu stehen. Jedenfalls werden (neben der Pflanzenbedeckung) die Temperatur- und Witterungsverhältnisse dafür ausschlaggebend sein, ob der Tau in größere Tiefen des oberen Rekondensationsbereiches geführt wird.

Die Luftbewegungen und Feuchtigkeitstransporte haben wir uns im oberen Rekondensationsbereich derart vorzustellen, daß während der Nacht Abwärtsbewegung der Luft nach Kondensation erfolgen und am Tage ein Aufwärtssteigen stattfindet, an dem in der Feuchtigkeitslieferung die mittlere Zone, wo die beschriebene Feuchtigkeitsanreicherung erfolgt, wesentlich für den oberen Raum beteiligt ist. Sie hat für einen weiteren Feuchtigkeitsaufstieg in trockenen Zeiten die erforderliche Wassermenge zu liefern.

Die Rekondensation als Tagesrhythmus ist nachweisbar, und zwar auch quantitativ. Das setzt notwendig eine additive Wirkung voraus und erbringt einen Beleg für die schon in Vermutung ausgesprochene Tatsache, daß durch Luftbewegung in Richtung auf ein bestimmtes Ziel eine Anreicherung von Kondenswasser in nachweisbaren Mengen möglich wird.

Durch Probeentnahme aus dem freien Erdboden, die sich hier allerdings aus versuchstechnischen Gründen nur auf mehr an der Oberfläche liegende Schichten beziehen kann, und durch Beobachtungen an dem beschriebenen Versuchsbehälter lassen sich Ergebnisse aufstellen, die wichtige Anhaltspunkte über die wesentliche Bedeutung der Rekondensationserscheinungen im Tagesrhythmus vermitteln. Einige Beobachtungen seien hier angeführt:

Kondensschwankungen im freien Erdboden

(Mittelwerte aus drei Untersuchungen, ermittelt im Sommer 1935)

1. Humus unbeschattet 10 cm tief		2. Humus unbeschattet, 25 cm tief	
13/7., + 29° C, 14 Uhr:	33,82%	31/5., + 6° C, 5 Uhr:	26,24%
14/7., + 12° C, 5 Uhr:	34,49%	31/5., + 22° C, 14 Uhr:	25,47%
14/7., + 31° C, 14 Uhr:	33,67%	1/6., + 5° C, 5 Uhr:	26,05%
15/7., + 15° C, 5 Uhr:	33,94%	1/6., + 20° C, 14 Uhr:	25,55%
15/7., + 30° C, 14 Uhr:	32,65%	2/6., + 6° C, 5 Uhr:	26,18%
16/7., + 11° C, 5 Uhr:	33,52%	2/6., + 23° C, 14 Uhr:	25,41%

Gewisse Fehlergrenzen werden wir für diese Untersuchungen einbeziehen müssen. Denn jede Untersuchung erfolgte mit einem anderen Material, und das ist durchaus möglich, daß gewisse Schwankungen in der Struktur der Probe Verschiedenheiten bedingen. Trotz dieser möglichen Fehler sind die Versuche überzeugend, und Beobachtungen in verschiedenen Bereichen des Versuchsbehälters lassen gewisse Schlüsse zu.

Endlich ist zu berücksichtigen, daß der Versuchsbehälter auch Untersuchungen in größeren Tiefen zuläßt, wobei allerdings dem Faktor der Temperaturschwankungen Beachtung zukommen muß. Die Beobachtungen erfolgten wie auch bei den Feststellungen im freien Boden an sonnigen Tagen ohne Niederschläge.

Kondensschwankungen im Versuchsraum
(Material: Sand mit Porenvolumen von 37,6%)

175 cm (25 cm tief):	15/10.,	+ 6° C,	5 Uhr:	20,97%
		+ 21° C,	14 Uhr:	19,56%
	16/10.,	+ 4° C,	5 Uhr:	21,24%
		+ 19° C,	14 Uhr:	19,23%
120 cm (80 cm tief):	15/10.,	+ 6° C,	5 Uhr:	8,44%
		+ 21° C,	14 Uhr:	8,21%
	16/10.,	+ 4° C,	5 Uhr:	8,27%
		+ 19° C,	14 Uhr:	8,05%
80 cm (120 cm tief):	15/10.,	+ 6° C,	5 Uhr:	21,75%
		+ 21° C,	14 Uhr:	19,30%
	16/10.,	+ 4° C,	5 Uhr:	21,08%
		+ 19° C,	14 Uhr:	19,64%
35 cm (165 cm tief):	15/10.,	+ 6° C,	5 Uhr:	12,86%
		+ 21° C,	14 Uhr:	12,29%
	16/10.,	+ 4° C,	5 Uhr:	12,92%
		+ 19° C,	14 Uhr:	12,67%
30 cm (170 cm tief):	15/10.,	+ 6° C,	5 Uhr:	43,17%
		+ 21° C,	14 Uhr:	45,23%
	16/10.,	+ 4° C,	5 Uhr:	47,11%
		+ 19° C,	14 Uhr:	47,64%

In der Natur dürfen die Temperaturen der Außenluft nicht mit denen im Boden gleichgesetzt werden. Im gewachsenen Boden ist mit einer Minderung zu rechnen, die mit zunehmender Tiefe immer größer wird; hier liegt ein allseitiger Zusammenhang vor, der sich beim Versuch nicht erreichen läßt. Etwa vorliegende Dampfströmungen sprechen eher für eine Vergrößerung der Oberflächenkondensation. Die Temperaturen im Boden sind auch vom Wassergehalt abhängig, da hiervon Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit wesentlich bestimmt werden. Betrachtungen über das Wesen der Zusammenhänge sind hier also nicht unbedingt mit quantitativen Beträgen in der Natur gleichzusetzen.

Beobachtungen über plötzliche Temperaturschwankungen

Plötzliche Temperaturänderungen finden ihren sichtbaren Ausdruck in Niederschlägen. Durch Abkühlung wird die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasser herabgesetzt, und es muß Kondensation und Wasserabgabe erfolgen. Unter Bezugnahme auf eine Untersuchung von G. ISERT (Halle 1937) wurde bereits früher das Problem der Rekondensation herausgestellt[37]). Aus dem gegebenen Beispiel ist ersichtlich, daß der Regen von einer verhältnismäßig geringen Tiefenwirkung ist, soweit sein unmittelbarer Einfluß beobachtet wird und eine Befriedigung der Wasserkapazität der oberen Schichten nicht vorliegt[38]). Mittelbar kommt der Niederschlag zu großer Bedeutung; er gibt der im Erdboden befindlichen Luft der oberen Zone Gelegenheit, sich maximal mit Wasser anzureichern, durch die damit verbundene Gewichts-

[37]) Vgl. Seite 25 ff.
[38]) Vgl. FRECKMANN und BAUMANN, Berlin 1937.

zunahme langsam nach unten zu sinken und im Verlauf der Tagesschwankungen Kondenswasser abzugeben. Diesen Erscheinungen geht Kondensation durch die mit dem Einsatz des Niederschlages verbundene Abkühlung im Bereich der im Boden befindlichen Luft voraus, die gleichzeitig der Luft neue Feuchtigkeitsaufnahme in der Folgezeit bei wieder einsetzender Erwärmung gestattet.

Hydrologische Erscheinungen sind vielfach im Hinblick auf ihre Wirkung an die ihnen zur Verfügung stehende Zeit gebunden. Diese Tatsache spielt im besonderen für den Regen eine große Rolle. Es bestehen in der Wirkung Unterschiede zwischen einem plötzlichen Regen von kurzer Dauer und einem sogenannten Landregen, der mehrere Stunden anhält. Die Unterschiede werden auch nicht ausgeglichen von einer bedeutenden Wassermenge bei plötzlichen Niederschlägen.

Beobachtungen bei kurzfristigem Niederschlag
Regenmenge: 11,7 mm
Dauer: 35 Minuten

Tiefe	Feuchtigkeit in Porenvolumen-Prozenten		
	vorher	nachher I	nachher II
0— 1 cm	28,6	94,3	78,4
1— 2 cm	27,9	78,8	65,1
2— 3 cm	28,1	32,1	31,3
3— 4 cm	28,3	30,6	30,9
4— 5 cm	27,5	28,0	
5— 6 cm	27,2	27,9	30,2
7— 8 cm	26,8	27,8	
9—10 cm	26,0	27,8	29,0
14—15 cm	24,3	25,2	29,3
19—20 cm	23,7	24,4	27,9

Der Boden hat das Bestreben, sich bei Niederschlägen zunächst auf seine Wasserkapazität aufzufüllen, ehe wesentliche Abwärtsbewegung erfolgt[39]). Diese Tendenz kann eine schwere Wasserabgabe an untere Bodenbereiche auf unmittelbarem Wege bedingen und ein schnelles und tieferes Einsinken der Feuchtigkeit verhindern, zumal die Wirkung der Schwerkraft keine Rolle spielt, da sie durch die weitaus größere Kapillarität aufgehoben ist[40]). Soll das Wasser direkt in größere Tiefen gelangen, so muß der Niederschlag über längere Zeiten erfolgen.

Um die Bedeutung und die Unterschiede zwischen kurzdauerndem und langwährendem Regen festzustellen, wurden einige Versuche in der Art durchgeführt, wie einer zu Beginn dieser Arbeit in einem anderen Zusammenhange bereits herangezogen ist[34]). Die Beobachtungen erfolgten durchweg in freiem Gelände im Bereiche eines Mutterbodens mit einem Porenvolumen von 28%. Es handelt sich um Messungen nach längeren Trockenperioden vor einsetzenden Niederschlägen und

[39]) Vgl. FRECKMANN und BAUMANN, Seite 19 f. ds. Arb.

[40]) Selbstverständlich ist Feinporigkeit Voraussetzung, wie wir sie bei Kulturböden allgemein antreffen und wofür die gesamten Ausführungen speziell gedacht sind.

unmittelbar nach dem Regen. Sie verteilen sich auf Frühjahr und Sommer, also auf die vegetative Zeit.

Es wird eine überall vorliegende Zunahme deutlich, die bis zu einer Tiefe von rund 2 cm als kapillar, bis zu 4 cm als molekular und in den Porenwinkeln erfolgt sowie durch Kondensation bedingt und darunter ausschließlich von der Kondensation her stammend hinsichtlich der Größe der Zunahme zu deuten ist. Die Größe der Rekondensation ist noch nicht erheblich; erst mit der Zeit und insbesondere über Nacht setzt eine wesentliche Kondensation ein, die als Reservoir das Wasser der obersten Schichten nimmt. Das belegen die Beobachtungen der dritten Spalte, die am folgenden Morgen um 5 Uhr durchgeführt wurden.

Wir finden gegenüber der mittleren Spalte, die die Daten unmittelbar nach dem Regen angibt, eine Verminderung der Feuchtigkeit in den oberen Zonen, die durch Verdunstung in Richtung nach oben und nach unten bedingt wird. Weiter ist ein Beleg erbracht, wie erst weitere Abkühlung im schon dargelegten Tagesrhythmus eine Auswertung bringt, die im Sinne einer Begünstigung der Wachstumsbedingungen für die Vegetation liegt.

Beobachtungen bei langdauernden Niederschlägen

Untersuchung I

Regenmenge: 2,48 mm
Dauer: 255 Minuten
Lufttemperatur vor dem Regen 31° C
nach dem Regen 18° C

Tiefe	Feuchtigkeit in PV-%	
	vorher	nachher
0— 1 cm	30,8	54,3
1— 2 cm	31,3	54,2
2— 3 cm	32,8	53,7
3— 4 cm	33,5	55,0
4— 5 cm	34,2	56,1
5— 6 cm	34,7	57,7
6— 7 cm	35,2	59,1
7— 8 cm	35,9	63,4
8— 9 cm	36,4	65,9
9—10 cm	35,5	67,2
14—15 cm	33,1	53,9
19—20 cm	34,6	38,5
24—25 cm	32,8	33,7

Die Ergebnisse liegen ganz anders, als sie bei einem plötzlichen Regen von kurzer Dauer ermittelt wurden. Auffallend sind die im Verhältnis zur Niederschlagsmenge wesentlich höheren Werte, als sie vorliegen müßten, wenn wir Vergleiche mit den Beobachtungen der kurzzeitigen Niederschläge anstellen. Allerdings verteilen sich die Werte hier auf einen größeren Bereich, wofür der Zeitfaktor ausschlaggebend ist.

Eine Woche später setzte erneut ein noch länger anhaltender Regen ein, der einen interessanten Fortgang der ermittelten Beobachtungswerte nach einer dazwischen liegenden Trockenzeit mit starker Erwärmung zuließ.

Untersuchung II

Regenmenge: 4,84 mm Dauer: 6 Stunden 50 Minuten
Temperatur vor dem Regen: 24° C nach dem Regen: 16° C

Tiefe	Feuchtigkeitsgehalt in PV-%		
	vorher	nachher I	nachher II
0— 1 cm	11,8	62,9	44,7
1— 2 cm	12,0	62,8	51,2
2— 3 cm	12,7	59,1	49,4
3— 4 cm	14.0	52,3	47,1
4— 5 cm	14,9	34,1	43,3
5— 6 cm	16,4	32,6	38,6
6— 7 cm	23,8	33,4	37,2
7— 8 cm	29,1	38,7	37,5
8— 9 cm	35,2	47,2	38,3
9—10 cm	42,5	56,6	43,8
10—11 cm	40,2	49,1	48,6
15—16 cm	41,7	42,3	51,1
20—21 cm	36,2	36,1	47,4
25—26 cm	31,3	31,4	45,9

Nach dem Regen wurden zwei Messungen durchgeführt, die zeitlich voneinander getrennt sind. Die Messung I bezieht sich auf Proben, die unmittelbar nach den Niederschlägen gegen 17 Uhr entnommen wurden, Messung II berücksichtigt Untersuchungen, die 36 Stunden später, also am übernächsten Morgen um 5 Uhr, erfolgten.

Ein Vergleich dieser beiden Ergebnisse zeigt, wie eine beträchtliche Nachwirkung erreicht ist[41]). Es hat eine völlige Verlagerung eingesetzt, die einem Feuchtigkeitstransport nach unten dient. Die Feuchtigkeitsstruktur bei I entspricht im wesentlichen der Untersuchung I (vgl. Seite 62).

Schlußbetrachtung und Ergebnis

Die organische Welt ist gebunden an den Wasserhaushalt der Erde. Wesentlich für ihre Erhaltung wird die im Erdboden befindliche Feuchtigkeit, die nicht nur unmittelbar durch Niederschläge entsteht, sondern

[41]) Hieran anschließend ist ein Ausblick möglich: Das Gießen und Sprengen, wie es der Mensch künstlich in Trockenzeiten durchführt, soll der Pflanze nicht allein unmittelbar Wasser zuleiten, sondern auch zu Rekondensationsvorgängen führen. Es wird damit gewissermaßen ein Reservoir im oberen Kapillarsaum geschaffen. Damit dieses Reservoir länger erhalten bleibt und möglichst intensiv wirkt, wird man die künstliche Bewässerung während der Abendstunden vornehmen, wonach die Kondensationsvorgänge während der Nacht günstig weiter wirken. So kann eine Tiefenwirkung erzielt werden, auf die es ankommt.

für die auch u. a. durch Grundwasser erzeugte Reservezonen mitsprechen, aus denen ein Nachschub in Bezirke eines Wasserbedarfes erfolgt.

Klimaverhältnisse bedingen für einige Gebiete unserer Erde Zeiten erhöhten und unterdrückten vegetativen Wachstums. Diesen Perioden gleicht sich die im Erdboden vorhandene Feuchtigkeit mengenmäßig an.

Alle diese Vorgänge erfolgen für eine oberflächliche Betrachtung unmerkbar. Erst Untersuchungen mit an natürliche Bedingungen angeglichenen Methoden vermögen Klarheit zu schaffen. Hier interessiert nicht der theoretische Versuch, sondern kann erst die Natur selbst das richtige Bild vermitteln.

Die durchgeführten Versuche geben durch größtmögliche Angleichung an natürliche Verhältnisse Aufschluß über die Feuchtigkeitsbewegungen im Laufe eines Jahres in durchgehend gleichartigem Boden. Wie weit die zahlenmäßigen Werte auf die Natur übertragen werden können, läßt sich nicht genau angeben. Denn es ist zu berücksichtigen, daß die Temperaturschwankungen im Erdboden mit der Tiefe abnehmen. Es mögen bis zum Kapillarsaum Wasserdampfbewegungen allein durch Oberflächenschwankungen vorliegen; aber auch diese werden nach der Tiefe zu schwächer sein, so daß Einschränkungen am Platze sind.

Dem gegenüber stehen in der Natur unendlich weite Zeiträume, die wieder als begünstigend aufzufassen sind. Trotz dieser auch zu berücksichtigenden Tatsachen bleiben wesentliche Feststellungen:

1. Die Kapillarität ist abhängig vom Porenvolumen und der unmittelbar über dem Kapillarsaum befindlichen Rekondensationszone, indem diese fördernd einwirken oder aber auch einen Verbrauch, also ein Sinken, bedingen kann. Der kapillare Anstieg erfolgt ganz anders, als er von gleichförmigen Kapillarröhren her bekannt ist. Das Gestein gibt ein Röhrennetz her und bildet dadurch Stützpunkte, die Begünstigung geben.
2. In einem einheitlichen Boden haben wir, im Sommer besonders betont, zwei Rekondensationszonen zu unterscheiden, von denen die obere ihre Feuchtigkeit in der Hauptsache von der Außenwelt, die untere vom Grundwasser her bezieht. Es liegen Überschneidungen vor, durch die eine Feuchtigkeitssammlung in den für die Vegetation besonders wichtigen Bereichen bedingt sein kann.
   Im Winter wird bei geeigneten Temperaturverhältnissen eine mehr einheitliche Rekondensationszone feststellbar, die zur Sammlung der Winterfeuchtigkeit beiträgt.
3. Reservoir für die Rekondensationsgebiete stellt einerseits das Grundwasser mit seinem Kapillarsaum, anderseits das von oben kommende Niederschlagswasser dar, das je nach Ergiebigkeit und Dauer der Einwirkung einer flacheren oder tieferen Bodenoberflächenschicht (Krume) Wasser zuführt. Die Weiterleitung der Feuchtigkeit erfolgt nicht nur direkt (Versickerung, Kapillarität), sondern auch auf dem Wege über die Luft als Transportmittel.
4. Die Feuchtigkeitsstruktur des Erdbodens im Vegetationsbereich ist ein Produkt der Klima- und jahreszeitlichen Verhältnisse, wobei die Bedeutung der Niederschläge und die damit verbundene direkte Zufuhr nicht übersehen werden darf.

5. Die unmittelbar quantitative Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Natur ist nicht möglich, wenn die Versuche auch das Wesen der Zusammenhänge aufzeigten. Die beste Parallele zur Natur dürften die Lößuntersuchungen bringen.
Die früher ausgeführten Anschauungen und Feststellungen über die Temperaturbedingungen im Erdboden nach den gebrachten Erörterungen verschiedener Forscher geben Gewähr für gewisse Übereinstimmung. Mit tiefer liegendem Grundwasserspiegel wird die Aufstiegsmöglichkeit abnehmen. Als wichtig dürfen Dampfströmungen angesehen werden, die auch bei ausschließlich oberflächlichen Temperaturschwankungen eine bestimmte Tiefenreichweite haben, die von der Materialstruktur abhängig sein wird.

Die Rekondensationsvorgänge sind rhythmische Erscheinungen zweiten Grades, indem sie von den Temperaturschwankungen abhängen. Wir werden folgende Gruppen unterscheiden müssen:

A. Die Tagestemperatur unterliegt regelmäßigen Schwankungen. In den frühen Morgenstunden finden wir ein Temperaturminimum, während der Mittagsstunden ein Temperaturmaximum. Für die Verhältnisse im Boden sprechen zeitliche Verzögerungen mit, wie das früher ausgeführt wurde[42]).
Hieran geknüpft sind rhythmische Tagesschwankungen, die Feuchtigkeitsnachschub in Bedarfszonen bringen. Der Rekondensationsraum ist Mobilzone zum Zwecke einer die Pflanzenwelt erhaltenden Bodendurchfeuchtung.

B. Neben der Tagesschwankung spielt die Jahresschwankung eine Rolle. Ihr gleicht sich die Vegetation in ihren Wachtumsperioden an, und die Rekondensationsvorgänge sind so gerichtet, daß sie mit diesen Erscheinungen parallel verlaufen.

C. Als dritter Faktor für die Feuchtigkeitsanreicherung im Erdboden spielen plötzliche Erscheinungen mit. Sie können in ihrer Auswirkung mehr oder weniger heftig sein. Wir haben sie mehr aufzufassen als Ausgleich für längere oder kürzere Trockenperioden. Doch wir wollen dabei grundsätzlich beachten, daß sich die Wirksamkeit dieser Erscheinungen auf die obersten Bereiche des Erdbodens bezieht, während wir in größeren Tiefen mit einer mehr stetigen Regelmäßigkeit zu rechnen haben. Die Bedeutung dieser mehr plötzlichen Rekondensationserscheinungen mag damit kleineren Pflanzen zukommen, die ihre Feuchtigkeit sowieso den Bereichen entnehmen, die größeren Schwankungen unterliegen.

[42]) Vgl. R. SÜRING, Berlin 1919, und C. KASSNER, Berlin 1902.

Literatur

ARAGOU, M.: Die Wasserabgabe der Luft im Boden. Courrier de l'Institut International de Mécano-Culture, février 1932.

ARAGOU, M.: Die unterirdische Taubildung. Rev. Int. d'Agric., 26, 177, 1935.

ATTERBERG: Die rationelle Klassifikation der Sande und Kiese. Chem.-Ztg., Köthen 1905, 15.

BORDAS, J.: Zur Kenntnis der unterirdischen Bewässerung. Verhandl. 6. Kommis. Internat. Bodenkundl. Ges., Tl. A, 214, 1932.

BRAUN, W.: Über das Verhalten grobkörniger und feinkörniger Sandböden bei Einfüllung in Röhren und Wasserzufuhr von oben oder unten, Ochsenfurt am Main 1933.

BRAZIER, C. E. und EBLE, L.: Über eine Besonderheit der Übertragung der Wärme im Boden. Compt. rend. Académie d'Agriculture France, 21, 813, 1935.

BRUINSMA, E. E. J.: Kondensation von Wasser im Boden. Landbouwk. Tijdschr. 37, 93, 1935.

DAMMANN, H.: Über den Wasserhaushalt des Bodens. Diss. Berlin 1905.

DIENERT, F.: Beitrag zum Studium des Ursprunges des unterirdischen Wassers. Compt. rend. Académie d'Agriculture France, 20, 153, 1934.

DOJARENKO, A. G.: Ausgewählte Arbeiten und Aufsätze, Moskau 1926.

EBERMAYER: Die physikalischen Einwirkungen des Waldes auf Luft und Boden und seine klimatologische und hygienische Bedeutung, Berlin 1873.

FITTON, E. M. und BROOKS, CH. F.: Bodentemperaturen in den Vereinigten Staaten. Monthly Weather Review, 59, 6, 1931.

FRECKMANN, W. und BAUMANN, H.: Zu den Grundfragen des Wasserhaushaltes im Boden und seiner Erforschung. Berlin 1937 (Bodenkunde und Pflanzenernährung S. 127).

GROUVEN, H.: Meteorologische Beobachtungen, Halle 1864.

HANN, J. v.: Lehrbuch der Meteorologie, Braunschweig 1886.

HEIDEN, E.: Kondensationsvermögen der Böden für Wassergas, Landw. Vers.-Stat. XXVI, Berlin 1881.

HELLRIEGEL, H.: Beiträge zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Ackerbaues, Braunschweig 1883.

HESSELINK, E. und HUDIG, H.: Hat die Kondensation der Luftfeuchtigkeit im Boden Bedeutung für die Bildung des Grundwassers? Meteorol. Ztschr. Juni 1923, S. 182.

HIRT, E.: Geologisch-hydrologische Beziehungen zwischen Fluß- und Grundwasser in der Saale-Elster-Aue südlich Halle, Halle 1937.

ISERT, G.: Der Betrag der Versickerung in der Gegend von Magdeburg, Ztschr. f. prakt. Geol., Juli, Halle 1937.

KASSNER, C.: Der Wärmehaushalt der Natur, Blätter für Zuckerrübenbau, Jg. IX, H. 10, Berlin 1902.

KEILHACK, K.: Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde, Berlin 1935.

KERÄNEN, J.: Über die Temperatur des Bodens und der Schneedecke in Sodankylä. Ann. Acad. Scient. Fennicae A, Tom. XIII, Nr. 7, Helsingfors 1920.

KING, F. H.: Über das Wasser im Boden. Seventh annual report of the Agricultural Experiment Station of the University of Wiskonsin, p. 134—162, 1890.

KING, F. H.: Jahresberichte d. Agr. Exp. Stat. Univ. Wiskonsin 1899, S. 214.

VON KLENZE: Untersuchungen über die kapillare Wasserleitung im Boden und die kapillare Sättigungskapazität desselben für Wasser. Landw. Jahrb., Berlin 1877.

KOEHNE, W.: Grundwasserkunde, Stuttgart 1928.

KONOLD, O.: Der Verlauf der Temperatur in den obersten Bodenschichten. Fortschr. d. Landw. 1933.

KOZENY: Über den kapillaren Wasseraufstieg im Boden, Kulturtechniker, Breslau 1924, S. 11—16.

KRAUSE, M.: Russische Forschungen auf dem Gebiete der Bodenstruktur, Berlin 1931.

KRÜGER, E.: Über die Verteilung des Wassers im Boden bei Aufstieg und Abstieg. Kulturtechniker, Breslau 1925, S. 179.

KUMM, A.: Kondensationswasser (i. BLANCK, Bodenlehre Bd. 5, S. 68—76), Berlin 1930.

KURAJAKOV, N.: Kapillare Erscheinungen im Boden und in den Erzeugnissen seiner Aufschwemmung, Pedology, 28, 27, 1933.

LEBEDEFF, A. F.: Die Rolle des dampfförmigen Wassers im Bereich der Boden- und Untergrundwässer. Arb. üb. landw. Meteor. XII, S. 125, 1913.

LEBEDEFF, A. F.: Die Wasserbewegung im Boden und Untergrund. Mitt. d. donischen Landw. Inst., Bd. 3, S. 220, 1918.

LEBEDEFF, A. F.: Die Bewegung des Wassers im Boden und im Untergrund. Ztschr. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, Berlin 1927/28.

LUEGER, O.: Die Wasserversorgung der Städte. Der städt. Tiefbau, Bd. 2, Stuttgart 1914/16.

MEIER, E.: Untersuchungen über die Untergrundbewässerung, Diss. Leipzig 1935.

MEINZER: The occurrence of ground water in the United States, Washington 1923.

MEZGER, CHR.: Über unterirdische Dampfströmungen und ihre Bedeutung für den Wasserhaushalt des Bodens. Journ. f. Landw. 1921, 69, 49—64.

MEZGER, CHR.: Grundwasserbildung und Quellenspeisung nach den neuesten Forschungsergebnissen. Gesundh.-Ing., 50 Jg. S. 501 ff, 1927.

MITSCHERLICH, E. A.: Bodenkunde, 4. Aufl., Berlin 1923.

NEUBERT, H. A.: Die Temperatur des Erdbodens in Dresden. Forsch. a. d. Gebiete d. Agrikulturphysik, X. Bd. 1888.

OLSZEWSKI, W.: Chemische Technologie des Wassers, Berlin 1925.

ORTH, HR.: Über den Einfluß des Grundwassers auf die Bodenfeuchtigkeit. Vierteljahresschr. f. gerichtl. Med. u. öff. Sanitätswesen, XXVIII Bd., S. 374 ff, Berlin 1877.

PFEFFER, W.: Die Wasserversorgung der Stadt Halle, S. 17 ff, Halle 1908.

RAMANN.: Bodenkunde, 3. Aufl. 1911.

ROTMISTROFF, W. G.: Die Wasserbewegung im Boden, Odessa 1906.

ROTMISTROFF, W. G.: Das Wesen der Dürre, Dresden und Leipzig 1926.

SCHLEH: Über die Bedeutung des Wassers in den Pflanzen und die Regulierung desselben in unseren Kulturböden, Leipzig 1876.

SCHULZE, B. und MEHRING, H.: Die Temperaturen des Bodens und des Wassers bei Breslau im Vergleich zu den Bodentemperaturen der Luft. Fühlings landw. Ztg. 57 H. 20, Stuttgart 1908.

SÜRING, R.: Temperatur-Anomalien im Sandboden, Berlin 1912.

SÜRING, R.: Der tägliche Temperaturgang in geringen Bodentiefen, Berlin 1919.

SCUPIN, H.: Zur Nomenklatur des Grundwassers und verwandter Begriffe. Ztschr. f. prakt. Geol. Jg. 43, S. 101 ff, Halle 1935 a.

SCUPIN, H.: Ab- und aufsteigendes Bodenwasser. Ztschr. f. prakt. Geol. Halle 1935 b.

SCUPIN, H.: Unstimmigkeiten zwischen Bodenfeuchtigkeit und Niederschlägen südlich von Halle. Ztschr. f. prakt. Geol., Halle, Juli 1937.

SEKERA, F.: Die nutzbare Wasserkapazität und die Wasserbeweglichkeit im Boden, Berlin 1931.

SPERANSKIJ, A. W.: und KRASCHENINNIKOW, TH.: Das hydroskopische Wasser und der unterirdische Tau. Russ. Journ. f. experim. Landw. III, S. 331, 1907.

ULE, W.: Zur Hydrographie der Saale. Forsch. z. dt. Landes- u. Völkerkunde, Bd. 10, H. 1, Stuttgart 1897.

VAGELER, P.: Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens, Berlin 1932.

WALTHER, J.: Das Gesetz der Wüstenbildung, Leipzig 1912.

WEISE, W.: Über den Einfluß der Bodentemperatur auf die Feuchtigkeit der oberen Bodenschichten. Mündener forstl. Hefte, Berlin 1894.

WOLLNY, W.: Untersuchungen über den Einfluß einer Schneedecke auf die Bodentemperatur, München 1879.

WOLLNY, E.: Einfluß der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens auf dessen Verdunstung, Heidelberg 1884.

WOLLNY, F.: Untersuchungen über die Bildung und die Menge des Taues, Leipzig 1893.

WRANGELL, M. v.: Ertragssteigernde Wirkung der Bodenabdeckung mit Dachpappe? Dt. Landw. Presse Nr. 27, Berlin 1927.

WRANGELL, M. v.: Anwendung der Bodenbedeckungskultur zu Melonen und Artischocken. Dt. Landw. Presse Dr. 12, Berlin 1929.

ZUNKER, F.: Zum kapillaren Aufstieg des Wassers im Boden. Kulturtechniker S. 188—197, Breslau 1924.

ZUNKER, F.: Neue Einblicke in die Wasserführung des Bodens. Kulturtechniker S. 148, Breslau 1926.

Lebenslauf

Ich wurde am 2. Mai 1913 als Sohn des Betriebsleiters Bruno Isert und seiner Ehefrau Gertrud, geb. Schreiber aus Magdeburg in Berlin geboren. Meine Kinderzeit verlebte ich in Magdeburg, wo ich Ostern 1919 zur Bürgerschule und von da Ostern 1922 zur Bismarck-Schule (Reform-Real-Gymnasium) kam. In der Prima gehörte ich der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung an. Am 26. Februar 1931 bestand ich dort die Reifeprüfung.

Ostern 1931 ging ich dann zur Pädagogischen Akademie in Halle (Saale), wo ich am 24. März 1933 die erste Prüfung für das Lehramt an Volksschulen ablegte.

Hierauf wandte ich mich dem Studium der Geologie, Physik und Botanik an der Martin Luther-Universität Halle-Wittenberg zu. Meine Lehrer waren Scupin, Weigelt, Hoffmann, Kast, Troll, Montfort, Vorländer, Tubandt, Scholder, v. Wolff.